



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE TECNOLOGÍA DE LA INDUSTRIA
INGENIERÍA MECÁNICA

“Mantenimiento integral y puesta en marcha de un sistema de compresión de aire para actividades de mantenimiento de equipos en el laboratorio de máquinas herramientas de la Facultad de Tecnología de la Industria (UNI-RUPAP).”

AUTOR:

Br. Raúl Ernesto Ruiz Rodríguez

TUTOR:

Ing. Jorge Alberto Rodríguez García

Managua, 11 de noviembre de 2016



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
Facultad de Tecnología de la Industria

DECANATURA

A: Brs. Raúl Ernesto Ruiz Rodríguez
DE: Facultad de Tecnología de la Industria
FECHA: Viernes 12 de agosto del 2016

Por este medio hago constar que su protocolo de Investigación Titulado **"Mantenimiento integral y puesta en marcha de un sistema de compresión de aire para actividades de mantenimiento de equipos en el laboratorio de máquinas herramientas de la Facultad de Tecnología de la Industria (UNIRUPAP)."**, para obtener el título de Ingeniero Mecánico y que contará con el Ing. Jorge Alberto Rodríguez García, ha sido aprobado por esta decanatura por lo que puede proceder a su realización.

Cordialmente,

Ing. Daniel Cuadra Horney
Decano



C/c Archivo

Managua 11 de noviembre del 2016

Ing. Daniel Cuadra Horney
Decano de la F.T.I.
Su despacho

Saludos cordiales Ing. Cuadra:

Por este medio le comunico que la monografía titulada "**Mantenimiento integral y puesta en marcha de un sistema de compresión de aire para actividades de mantenimiento de equipos en el laboratorio de máquinas herramientas de la facultad de tecnología de la industria, (UNI-RUPAP)**", elaborada por el Br. **Raúl Ernesto Ruiz Rodríguez** está lista para su correspondiente presentación y defensa al jurado que usted como máxima autoridad académica disponga.

Sin otro particular me despido de usted.

Atentamente



Master Jorge Alberto Rodríguez García

Tutor de la monografía

Cc: Archivo

CONSTANCIA

Hago constar que el bachiller **Raúl Ernesto Ruiz Rodríguez**, con carnet estudiantil 2011-37222 y quien se identifica con cédula de identidad 001-281293-0033M, ha trabajado en el taller de máquinas herramientas en la restauración del compresor de aire de la FTI, el cual tiene las siguientes características:

Fabricante: Campbell Hausfeld

Código de inventario 07-2-11001-10-281-2

Modelo VT558705AJ

Dicha restauración está enmarcada dentro de la monografía titulada **“Mantenimiento integral y puesta en marcha de un sistema de compresión de aire para actividades de mantenimiento de equipos en el laboratorio de máquinas herramientas de la Facultad de Tecnología de la Industria (UNI-RUPAP)”**. El equipo responde satisfactoriamente a las pruebas realizadas y se encuentra apto en su funcionamiento.

Se extiende la presente para los fines que estime convenientes en la ciudad de Managua a los 18 días del mes de Noviembre del año 2016


Ing. César Blandino Rayo
J' Depto. de talleres FTI





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
Facultad de Tecnología de la Industria

SECRETARÍA DE FACULTAD

F-8: CARTA DE EGRESADO

El Suscrito Secretario de la **FACULTAD DE TECNOLOGÍA DE LA INDUSTRIA** hace constar que:

RUIZ RODRÍGUEZ RAÚL ERNESTO

Carne: **2011-37222** Turno **Diurno** Plan de Estudios **972A** de conformidad con el Reglamento Académico vigente en la Universidad, es **EGRESADO** de la Carrera de **INGENIERÍA MECÁNICA**.

Se extiende la presente **CARTA DE EGRESADO**, a solicitud del interesado en la ciudad de Managua, a los cuatro días del mes de marzo del año dos mil dieciseis.

Atentamente,

Ing. Wilmer José Ramírez Velásquez
Secretario de Facultad



Dedicatoria

Al padre celestial, a sus ángeles y sus santos.

A mis padres Sergio José Ruiz Amaya y María Soledad Rodríguez Rodríguez; a mis hermanos Carlos Eduardo Ruiz Rodríguez y Sergio Ricardo Ruiz Rodríguez. Gracias por todo su amor, esfuerzo, interés y apoyo incondicional hacia mí a lo largo de toda mi vida.

A toda mi familia en general, incluyendo a los que ya no nos acompañan: Emma Amaya (Q.E.P.D.), Manuel Ruiz (Q.E.P.D.), Francisco Ruiz (Q.E.P.D.), José Genaro Rodríguez (Q.E.P.D.), Eduardo Rodríguez (Q.E.P.D.) y Leila Vanessa Rodríguez Zamora (Q.E.P.D.).

A los estudiantes de todo el mundo; con la esperanza de que este trabajo monográfico estimule la acción de restauración de equipos.

A toda la vida existente en el universo, en especial la del planeta Tierra.

A la humanidad como un todo; cada pequeño paso que dé es suyo también.

Raúl Ernesto Ruiz Rodríguez

Agradecimientos

Le agradezco primeramente al Colochon (Dios) por haberme permitido llegar al momento de culminación de mi carrera de pregrado.

A mi familia y a mis amigos (incluyendo a los seres vivos), gracias por su apoyo incondicional y por su interés en la culminación de este trabajo monográfico.

A mi hermano Carlos Eduardo Ruiz Rodríguez por todas sus enseñanzas y consejos en lo concerniente a la parte eléctrica.

A mi padre Sergio José Ruiz Amaya por sus saberes en lo que respecta a redacción.

A mi tutor Msc. Jorge Alberto Rodríguez García por todo el apoyo brindado a lo largo del desarrollo de este trabajo monográfico; por los consejos, enseñanzas y aprendizajes obtenidos en la realización de esta monografía.

Al profesor Pablo Motta, profesor Aarón Suazo y a Doña Rosita; muchas gracias por el apoyo brindado; el préstamo de herramientas ha sido de mucha utilidad en el desarrollo del presente trabajo.

Resumen

El presente documento es el resultado de un proyecto de restauración. En el documento se refleja el conjunto de pasos que sirvieron como base para la reconstrucción del sistema de compresión de aire.

El capítulo I contempla la introducción y sitúa al lector en las condiciones de realización del trabajo monográfico. El capítulo II define los objetivos propuestos al elaborar el presente y el capítulo III precisa la justificación (el por qué) de ejecutarlo.

El capítulo IV aborda el marco teórico. En el marco teórico se desarrollan conceptos básicos sobre compresores (definición, tipos, partes, entre otros), leyes termodinámicas que los rigen, sistema eléctrico y fundamentos de la actividad de mantenimiento. Adicionalmente, se relacionan estos conceptos con el sistema de compresión de aire marca Campbell Hausfeld, y se analizan sus efectos sobre este.

El capítulo V muestra el análisis y presentación de resultados. En dicho capítulo se expone la metodología que se siguió para la restauración del equipo. Se presenta el proceso de diagnóstico de todos los subsistemas del equipo; entre ellos: sistema eléctrico, sistema mecánico, sistema de instrumentación y control y sistema de almacenamiento de aire. Posteriormente se muestra una descripción detallada de la actividad de mantenimiento ejecutada en cada parte componente del equipo. En la sección de “Líneas futuras” se presenta una alternativa para mejorar diversos aspectos del sistema de compresión de aire. De igual forma, se describen las pruebas realizadas al equipo una vez restaurado y se exhibe un análisis económico relacionado a los costos en los que se incurrió para la realización de la presente monografía. Al final de este apartado y, no menos importante, se define el plan de mantenimiento a seguir y se muestra una guía de diagnóstico de fallas.

El capítulo VI contempla lo relacionado a las conclusiones y recomendaciones a las que se llegaron una vez finalizado el trabajo monográfico.

Finalmente, los capítulos VII y VIII exhiben las fuentes bibliográficas empleadas en la realización del presente y los anexos, respectivamente.

Índice

I.	Introducción.....	1
II.	Objetivos	2
	Objetivo general.....	2
	Objetivos específicos	2
III.	Justificación	3
IV.	Marco teórico.....	5
	4.1 Definición de compresor.....	5
	4.2 Leyes termodinámicas que rigen el funcionamiento de un compresor	7
	4.3 Breve clasificación de los compresores	9
	4.4 Compresores recíprocos	10
	4.4.1 Tipos.....	10
	4.4.2 Multietapas de compresión	13
	4.4.3 Partes	16
	4.4.4 Mantenimiento	19
	4.4.5 Sistema eléctrico	23
V.	Análisis y presentación de resultados	27
	5.1 Diagnóstico	27
	5.1.1 Sistema eléctrico	27
	5.1.2 Sistema mecánico	32
	5.1.3 Sistema de instrumentación y control	40
	5.1.4 Sistema de almacenamiento de aire.....	42
	5.2 Mantenimiento integral y puesta en marcha del sistema de compresión de aire. 45	

5.2.1	Mantenimiento integral del equipo	45
5.2.2	Maniobra eléctrica	65
5.3	Líneas futuras	70
5.4	Pruebas realizadas.....	72
5.5	Análisis económico.....	73
5.6	Plan de mantenimiento y diagnóstico de fallas	73
5.6.1	Plan de mantenimiento	74
5.6.2	Guía de diagnóstico de fallas	79
VI.	Conclusiones y Recomendaciones.....	81
VII.	Bibliografía consultada	83
VIII.	Anexos	I
8.1	Anexo A: Costos de restauración y cotización de compresor nuevo.....	II

Lista de figuras

<i>Figura 4.1-1. Subsistemas de un sistema de compresión de aire.</i>	5
<i>Figura 4.1-2. Sistema de compresión de aire.</i>	6
<i>Figura 4.1-3. Soplador de aire.</i>	6
<i>Figura 4.1-4. Ventilador de aire.</i>	7
<i>Figura 4.3-1. Clasificación de los compresores.</i>	10
<i>Figura 4.4.1-1. Tipos de compresores reciprocantes.</i>	10
<i>Figura 4.4.1-2. Compresor de tronco.</i>	11
<i>Figura 4.4.1-3. Compresor de cruceta.</i>	11
<i>Figura 4.4.1-4. Compresor de pistón libre.</i>	12
<i>Figura 4.4.1-5. Compresor de pistón de tipo laberinto.</i>	12
<i>Figura 4.4.1-6. Compresor de diafragma o membrana.</i>	13
<i>Figura 4.4.2-1. Diagrama presión-volumen de un compresor de una etapa.</i>	14
<i>Figura 4.4.2-2. Diagrama teórico combinado de indicador de un compresor de doble etapa.</i>	15
<i>Figura 4.4.2-3. Temperatura teórica de descarga para compresores de 1,2 y 3 etapas.</i>	15
<i>Figura 4.4.5-1. Motor eléctrico y sus componentes.</i>	25
<i>Figura 4.4.5-2. Funciones de la corriente alterna (AC) y corriente directa (DC).</i>	25
<i>Figura 4.4.5-3. Esmeriladora Bosch.</i>	25
<i>Figura 4.4.5-4. Circuito de maniobra eléctrica para un motor eléctrico (trifásico en este caso).</i>	27
<i>Figura 5.1.1-1. Devanados del estator del motor eléctrico Century.</i>	28
<i>Figura 5.1.1-2. Medición de la resistencia eléctrica en el devanado principal.</i>	29
<i>Figura 5.1.1-3. Vista de planta del capacitor de marcha.</i>	29
<i>Figura 5.1.1-4. Especificaciones técnicas del capacitor de marcha.</i>	30
<i>Figura 5.1.1-5. Fuga de dieléctrico del capacitor de arranque.</i>	30
<i>Figura 5.1.1-6. Especificaciones técnicas del capacitor de arranque.</i>	31
<i>Figura 5.1.1-7. Relé centrífugo del motor eléctrico Century.</i>	31
<i>Figura 5.1.2-1. Polea impulsada acanalada del compresor marca Campbell Hausfeld.</i>	32
<i>Figura 5.1.2-2. Cuña de polea acanalada del compresor.</i>	33
<i>Figura 5.1.2-3. Prisionero de polea acanalada del compresor.</i>	33
<i>Figura 5.1.2-4. Suciedad y depósitos de aceite presentes en la caja del cigüeñal.</i>	34
<i>Figura 5.1.2-5. Junta deteriorada de la caja del cigüeñal.</i>	34
<i>Figura 5.1.2-6. Rodamiento de agujas de la caja del cigüeñal.</i>	34
<i>Figura 5.1.2-7. Rodamiento de agujas de la tapa del cigüeñal.</i>	35
<i>Figura 5.1.2-8. Junta de tapa del cigüeñal.</i>	35
<i>Figura 5.1.2-9. Bloque de cilindros.</i>	35
<i>Figura 5.1.2-10. Suciedad y deposiciones de aceite en la cabeza.</i>	36
<i>Figura 5.1.2-11. Junta en mal estado del conjunto bloque-cabeza.</i>	36

<i>Figura 5.1.2-12. Anillos de pistón.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 5.1.2-13. Cabezas de pistones.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 5.1.2-14. Bielas de pistones.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 5.1.2-15. Cojinetes de bielas.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 5.1.2-16. Pie de biela y bulón de pistón.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 5.1.2-17. Pernos de biela.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 5.1.2-18. Muñequillas y contrapesos del cigüeñal.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 5.1.2-19. Pequeñas penetraciones en la superficie del cigüeñal.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 5.1.3-1. Líneas del presostato.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 5.1.3-2. Manómetro para la medición de diferencia de presiones.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 5.1.3-3. Válvula de alivio de presión.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 5.1.3-4. Válvula anti-retorno (válvula check).....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 5.1.4-1. Tanque de almacenamiento de aire.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 5.1.4-2. Perno de purga.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 5.1.4-3. Tubería de cobre del sistema de compresión de aire.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 5.1.4-4. Manguera del sistema de compresión de aire.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 5.2.1-1. Terminales eléctricas del estator.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 5.2.1-2. Terminales de espada de los alambres del estator.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 5.2.1-3. Superficie externa de carcasa lijada y terminales del estator.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 5.2.1-4. Superficie externa de carcasa pintada.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 5.2.1-5. Tapa de motor eléctrico.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 5.2.1-6. Rotor del motor eléctrico.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 5.2.1-7. Capacitor de marcha para el motor eléctrico.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 5.2.1-8. Caja de capacitor de marcha.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 5.2.1-9. Capacitor de arranque del motor eléctrico.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 5.2.1-10. Caja de capacitor de arranque.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 5.2.1-11. Relé centrífugo del rotor.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 5.2.1-12. Superficie externa de la caja del cigüeñal.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 5.2.1-13. Vista de planta de la caja del cigüeñal.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 5.2.1-14. Junta de estanqueidad del conjunto bloque-caja del cigüeñal.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 5.2.1-15. Superficie externa de la tapa del cigüeñal.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 5.2.1-16. Superficie interna de la tapa del cigüeñal.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 5.2.1-17. Junta de estanqueidad de la tapa del cigüeñal.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 5.2.1-18. Bloque de cilindros.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 5.2.1-19. Vista de planta del bloque de cilindros.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 5.2.1-20. Superficie inferior de la cabeza y sus válvulas.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 5.2.1-21. Vista superior de cabeza y o-ring instalado.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 5.2.1-22. Junta de estanqueidad del conjunto bloque de cilindros-cabeza.....</i>	<i>55</i>

<i>Figura 5.2.1-23. Cabeza de pistón.</i>	55
<i>Figura 5.2.1-24. Anillos de pistón.</i>	56
<i>Figura 5.2.1-25. Conjunto biela-bulón.</i>	56
<i>Figura 5.2.1-26. Cojinetes de biela.</i>	56
<i>Figura 5.2.1-27. Pernos de biela.</i>	57
<i>Figura 5.2.1-28. Cigüeñal visto desde una perspectiva superior inclinada.</i>	57
<i>Figura 5.2.1-29. Cigüeñal visto desde una perspectiva lateral inclinada.</i>	57
<i>Figura 5.2.1-30. Interior del presostato.</i>	58
<i>Figura 5.2.1-31. Terminales de tierra del presostato.</i>	58
<i>Figura 5.2.1-32. Switch del presostato.</i>	59
<i>Figura 5.2.1-33. Alojamiento de cable de alimentación al motor (izquierda) y cable de alimentación al circuito (derecha).</i>	59
<i>Figura 5.2.1-34. Válvula de descarga del presostato.</i>	59
<i>Figura 5.2.1-35. Manómetro SEAL FAST de 200 psi.</i>	60
<i>Figura 5.2.1-36. Válvula de alivio de presión de 140 psi.</i>	60
<i>Figura 5.2.1-37. Válvula anti-retorno (válvula check).</i>	61
<i>Figura 5.2.1-38. Procedimiento de pintado del tanque de almacenamiento de aire.</i>	61
<i>Figura 5.2.1-39. Tanque de almacenamiento de aire.</i>	62
<i>Figura 5.2.1-40. Regulador de presión del aire a la salida del tanque.</i>	62
<i>Figura 5.2.1-41. Acoples del regulador de presión de aire con el tanque de almacenamiento.</i>	63
<i>Figura 5.2.1-42. Perno de purga.</i>	63
<i>Figura 5.2.1-43. Tubería de cobre: del compresor al presostato (arriba), del compresor al tanque (abajo).</i>	63
<i>Figura 5.2.1-44. Manguera para el transporte del aire comprimido.</i>	64
<i>Figura 5.2.1-45. Pistola sopleteadora.</i>	64
<i>Figura 5.2.2-1. Panel eléctrico (derecha) del laboratorio de máquinas herramientas. Centro de carga y breaker del sistema de compresión de aire (izquierda). A como puede observarse, se ha derivado del panel del laboratorio un subpanel correspondiente al sistema de compresión de aire.</i>	69
<i>Figura 5.2.2-2. Cable eléctrico protoduro AWG 10.</i>	69
<i>Figura 5.2.2-3. Toma superficial EAGLE de 50A y 125-250V.</i>	70
<i>Figura 5.2.2-4. Enchufe EAGLE de 50A y 125-250V.</i>	70
<i>Figura 5.3-1. Arrancadores suaves de diferente capacidad.</i>	71
<i>Figura 5.6.1-1. Deflexión de una banda bien ajustada.</i>	75
<i>Figura 5.6.2-1. Guía de diagnóstico de fallas de Campbell Hausfeld.</i>	79
<i>Figura 5.6.2-2. Continuación de guía de diagnóstico de fallas de Campbell Hausfeld.</i>	80

Lista de tablas

<i>Tabla 5.2.2-1. Corriente a máxima carga en Amperes, motores de corriente alterna monofásicos. Cortesía de NEC (National Electric Code), United States of America.</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 5.2.2-2. Máximo índice o ajuste de cortocircuito del derivado de circuito del motor y dispositivos protectores de falla a tierra. Cortesía de NEC (National Electric Code), United States of America.</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 5.2.2-3. Tabla de protección de circuitos de motores. Cortesía de Cooper Bussmann Inc.</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 5.4-1. Pruebas realizadas al sistema de compresión de aire y sus respectivos comentarios.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 5.6.1-1. Actividades de mantenimiento básicas para el sistema de compresión de aire.</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 8.1-1. Costos asociados a la instalación eléctrica del sistema de compresión de aire.</i>	<i>II</i>
<i>Tabla 8.1-2. Costos asociados al mantenimiento integral del sistema de compresión de aire.</i>	<i>III</i>
<i>Tabla 8.1-3. Costo total de la restauración del sistema de compresión de aire.</i>	<i>IV</i>
<i>Tabla 8.1-4. Comparación de precios y porcentaje del costo de mantenimiento con relación a un sistema de compresión de aire nuevo. Los precios están en córdobas.</i>	<i>IV</i>

I. Introducción

En la Universidad Nacional de Ingeniería, Recinto Universitario Pedro Arauz Palacios, ubicado en Managua, Nicaragua, existen tres facultades: Facultad de Tecnología de la Construcción (F.T.C.), Facultad de Ciencias y Sistemas (F.C.S.) y la Facultad de Tecnología de la Industria (F.T.I.).

En la F.T.I. existen dos carreras: Ingeniería Industrial e Ingeniería Mecánica. En ambas carreras, las prácticas de laboratorio son un factor importante en el aprendizaje de los estudiantes, tal y como se ve reflejado en el perfil profesional de ambas carreras.

Las máquinas ubicadas en el laboratorio de máquinas herramientas necesitan limpieza, pintura, mantenimiento, entre otras; operaciones que se podrían facilitar mediante la utilización de un sistema de compresión de aire. Actualmente, el aire comprimido es un recurso indispensable dentro de la industria. Su uso no sólo consiste en facilitar la limpieza de equipos, sino también para la operación de herramientas neumáticas (por ejemplo, pistolas, taladros, etc.) y operaciones de pintura, que pueden ser de utilidad en el laboratorio de máquinas herramientas.

La F.T.I. posee un sistema de compresión de aire modelo VT558705AJ, marca Campbell Hausfeld, año de fabricación 1993; sin embargo, se encuentra en estado inoperante. Esto impide su uso y funcionalidad al laboratorio de máquinas herramientas.

El motivo del presente trabajo consiste en desarrollar un mantenimiento integral en este sistema, que permita su restauración y su uso para las operaciones que se realizan en este laboratorio.

II. Objetivos

Objetivo general

- Proporcionar al laboratorio de máquinas herramientas de la Facultad de Tecnología de la Industria (F.T.I.) de un sistema de compresión de aire para actividades de mantenimiento mediante la restauración del sistema que actualmente se encuentra en la condición de inoperante.

Objetivos específicos

- Diagnosticar las averías del sistema de compresión de aire mediante la observación y verificación del estado de cada componente del mismo.
- Seleccionar los componentes técnicamente adecuados para la puesta en marcha del sistema de compresión de aire, en correspondencia con los resultados obtenidos del diagnóstico del sistema.
- Dimensionar el circuito de maniobra eléctrica del compresor de aire acorde con la norma eléctrica nacional para garantizar la buena operación y seguridad del operario.
- Elaborar el plan de mantenimiento del compresor de aire siguiendo las recomendaciones del fabricante para asegurar un mejor funcionamiento y extender la vida útil del equipo.

III. Justificación

La Facultad de Tecnología de la Industria cuenta con un sistema de compresión de aire, el cual se encuentra dañado. Al operar los equipos del taller de máquinas herramientas, o realizar las prácticas de laboratorio, las maquinas se ensucian con polvo, virutas y otras sustancias; aquí juega un papel importante el sistema de compresión de aire.

El propósito de este tema monográfico surge para activar el sistema de compresión de aire y, como consecuencia de esto, se obtiene el beneficio de suplir la necesidad de limpieza por parte de los equipos, y así evitar complicaciones tanto en el funcionamiento de las máquinas, como durante su mantenimiento. De igual manera, el uso del sistema de compresión de aire se puede extender a la limpieza y mantenimiento de otros equipos (como motores diésel, motores de gasolina), usarse en herramientas neumáticas y en operaciones de pintura, entre otros.

Complementariamente, se le añadirá al sistema de compresión de aire un circuito de maniobra eléctrica, que permita la buena operación y que el operario se encuentre seguro; esto refuerza las condiciones de seguridad industrial, necesarias en este laboratorio.

Adicionalmente, el consumo energético se podrá ver afectado con la implementación en el futuro de dispositivos electrónicos que permitan un sistema de arranque suave (soft starters), reduciendo así la energía consumida durante el arranque y, por ende, incrementando la eficiencia energética global del sistema.

Finalmente, los costos por reparaciones y mantenimientos correctivos se verán reducidos con la elaboración de un plan de mantenimiento para el equipo, disminuyendo los costos de operación de los laboratorios.

De esta forma se define como **problema científico-tecnológico** la rehabilitación total del sistema de compresión de aire, modelo VT558705AJ, marca Campbell Hausfeld, año de fabricación 1993.

El **objeto de estudio** es el sistema de compresión de aire, su **campo de acción** está enmarcado en las actividades de mantenimiento correctivo del equipo en análisis, considerando los conocimientos desarrollados en la carrera de Ingeniería Mecánica sobre termodinámica, electrotecnia y tribología.

Se define la **hipótesis**:

“Si se recupera el compresor de aire marca Campbell Hausfeld, implementando un circuito de maniobra eléctrica y planificando un régimen de mantenimiento, entonces se incrementará la confiabilidad y seguridad en la operación del sistema”.

IV. Marco teórico

4.1 Definición de compresor

Los compresores, al igual que los sopladores y ventiladores (Figura 4.4.1-2 a Figura 4.4.1-4), son máquinas cuyo propósito es incrementar la presión de fluidos compresibles e inducir un desplazamiento del fluido (Bloch & Hoefner, 1996). Un sistema de compresión de aire puede ser de varios tipos y está compuesto por varios subsistemas (que serán explicados a lo largo del presente capítulo), tal y como se observa en la Figura 4.4.1-1.

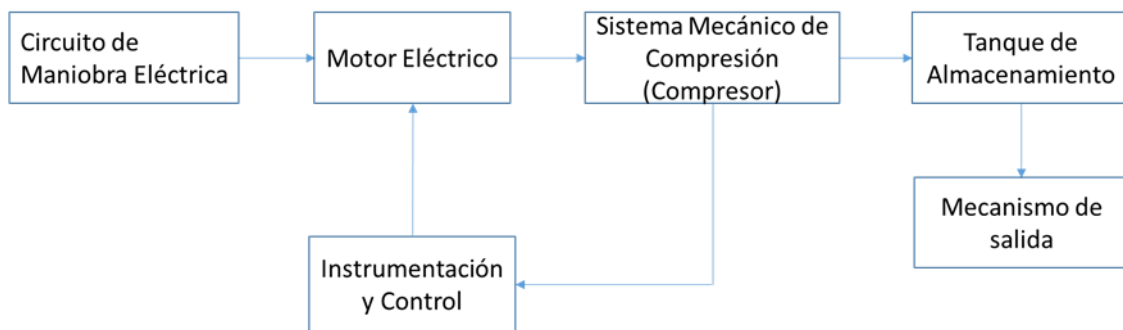


Figura 4.4.1-1. Subsistemas de un sistema de compresión de aire recíprocante.

El incremento de presión se realiza mediante el confinamiento de la sustancia (aire en este caso particular) y una interacción energética entre el compresor y la sustancia, absorbiendo esta última el trabajo suministrado al compresor por la fuente motriz (motor eléctrico en este caso).

No debe confundirse a las bombas con los compresores, aun cuando ambos tienen el mismo propósito (elevar la presión de un fluido y desplazarlo). Mientras la primera es una máquina hidráulica (trabaja con fluidos incompresibles); la otra, por su parte, es una máquina que trabaja con fluidos compresibles (que varían su densidad cuando se someten a un cambio de presión o de temperatura). Cabe destacar que los ventiladores y sopladores actúan también como compresores, solo que con un menor valor de la razón de presiones respecto a los últimos (Bloch & Hoefner, 1996).

Nombre de maquina	Rango de presiones
Compresores	35 psi hasta 65,000 psi.
Sopladores	Límite superior de 50 psi.
Ventiladores	Límite superior de 1 psi.



Figura 4.4.1-2. Sistema de compresión de aire.



Figura 4.4.1-3. Soplador de aire.



Figura 4.4.1-4. Ventilador de aire.

4.2 Leyes termodinámicas que rigen el funcionamiento de un compresor

Los compresores, al ser máquinas que trabajan con fluidos compresibles, están regidos por 2 principios termodinámicos: la primera ley de la termodinámica y la segunda ley de la termodinámica.

Primera ley de la termodinámica:

Esta ley plantea que la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma. Esto quiere decir dos cosas: en los procesos termodinámicos la energía de una forma se convierte en otra y que ningún dispositivo puede brindar mayor energía que la que recibe.

Segunda ley de la termodinámica:

Esta ley básicamente plantea que, si el resultado de un proceso termodinámico es una degradación de la energía en cuanto a su capacidad para transformarse en trabajo, el proceso ocurrirá (José Ángel Manrique Valadez, 2005). Existen dos axiomas (equivalentes en sus consecuencias) de esta ley, estos son:

Axioma de Clausius: El calor siempre fluye de la región de mayor temperatura a la región de menor temperatura.

Axioma de Kelvin-Planck: Es imposible para cualquier dispositivo el operar de forma cíclica, producir un trabajo e intercambiar calor solo con una región de temperatura constante.

Estos axiomas establecen que un dispositivo debe operar entre dos regiones de temperatura, una de alta y otra de menor temperatura.

La segunda ley también impone severas restricciones a la primera ley de la termodinámica, ya que plantea que el valor de eficiencia de una maquina térmica nunca será mayor que el de una maquina térmica reversible (no presenta fricción) si ambas operan entre los mismos límites de temperatura (José Ángel Manrique Valadez, 2005).

Sin embargo, existe otro planteamiento que corresponde a la segunda ley, pero que también es equivalente a los anteriores (Clausius y Kelvin-Planck); este es el principio de incremento de entropía. Este principio plantea que la entropía (propiedad termodinámica) siempre se crea durante los procesos termodinámicos y que, a lo sumo, permanece constante; la perfección de un proceso termodinámico es mayor mientras la creación de entropía entre dos estados termodinámicos sea menor.

Las leyes de la termodinámica influyen de forma directa a las características operacionales del sistema de compresión de aire. Existe una conversión de energía eléctrica (proveniente de la red eléctrica) que se transforma en energía mecánica mediante el motor eléctrico. Sin embargo, dado que todos los procesos termodinámicos que ocurren en el compresor son reales, siempre habrá un grado de imperfección (irreversibilidad) que hará que la energía mecánica procedente del motor eléctrico se degrade; es decir, que pierda su capacidad para hacer trabajo, por lo que el trabajo neto ejercido sobre la sustancia (aire) será menor conforme estas irreversibilidades aumenten.

Adicionalmente, mientras mayor sea la creación de entropía entre los procesos termodinámicos (mas irreversibles), mayor será la temperatura final de la sustancia (aire) dada una relación de compresión. Esto contribuye a que exista una mayor transferencia de calor hacia los subsistemas, logrando de esta forma un mayor incremento de la temperatura en los componentes; por consiguiente, imponiendo mayores exigencias al sistema de enfriamiento, que debe ser capaz de mantener los niveles de temperatura dentro de los márgenes de diseño.

4.3 Breve clasificación de los compresores

Los compresores se clasifican en 3 grandes categorías (Figura 4.4.1-1): compresores dinámicos, compresores de desplazamiento positivo rotatorios y compresores de desplazamiento positivo reciprocantes.

Compresores dinámicos: Son máquinas rotatorias de flujo continuo que convierten la velocidad del fluido en una presión del fluido. Estas operan a velocidades de giro muy elevadas y la acción de compresión es también ejercida por estatores difusores.

Compresores de desplazamiento positivo rotatorios: Los compresores de desplazamiento positivo se rigen por el principio de desplazamiento positivo, el cual consiste en inducir un flujo de fluido como resultado de una disminución en el volumen de una cámara. En estas unidades la compresión y el desplazamiento resultan de la acción de los elementos rotatorios.

Compresores de desplazamiento positivo reciprocantes: Son unidades en las que sucesivas cantidades de gas se confinan dentro de un espacio cerrado y luego su presión es elevada gracias a la acción de un mecanismo reciprocante.

A como puede observarse en la Figura 4.4.1-1 y, de acuerdo a la clasificación anterior, el sistema de compresión de aire marca Campbell Hausfeld es un compresor de desplazamiento positivo reciprocante, ya que dentro de los cilindros se

confinan sucesivas cantidades de aire cuya presión es elevada por la operación de un mecanismo reciprocante.

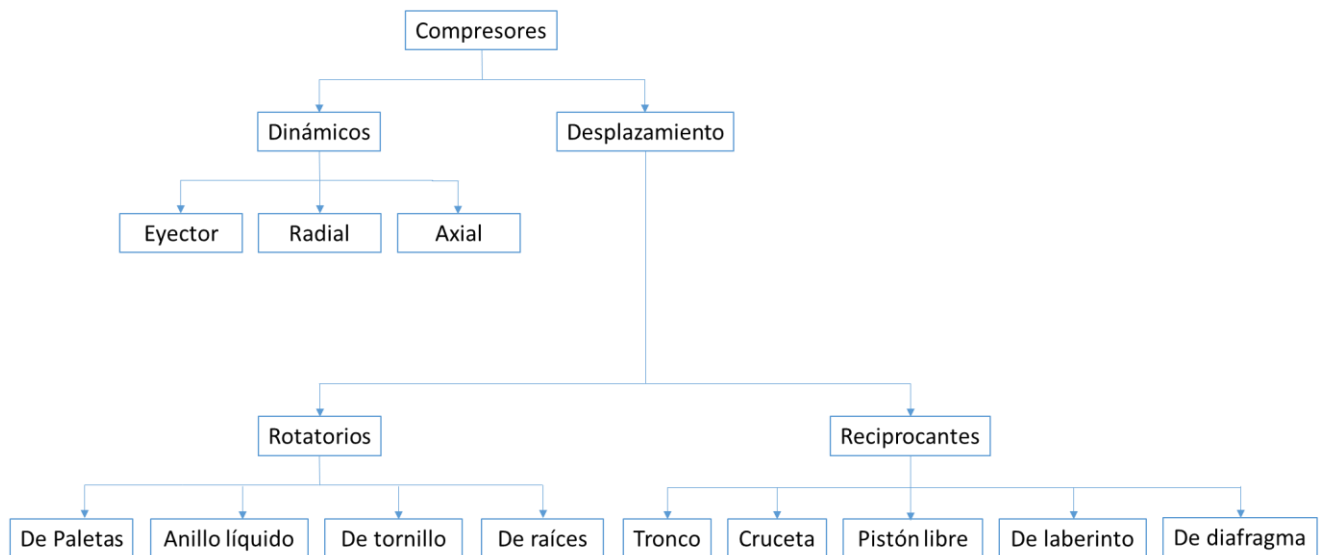


Figura 4.4.1-1. Clasificación de los compresores.

4.4 Compresores reciprocantes

Debido a que el objeto de estudio del presente trabajo corresponde a un compresor de aire reciprocante, combinado con el hecho de que este tipo de compresores son los más conocidos y utilizados dentro de la categoría de los compresores de desplazamiento positivo, el presente acápite abordará los siguientes aspectos de los compresores reciprocantes: tipos, multietapas de compresión, partes, mantenimiento y sistema eléctrico.

4.4.1 Tipos

Los tipos de compresores reciprocantes se presentan en la Figura 4.4.1-1.

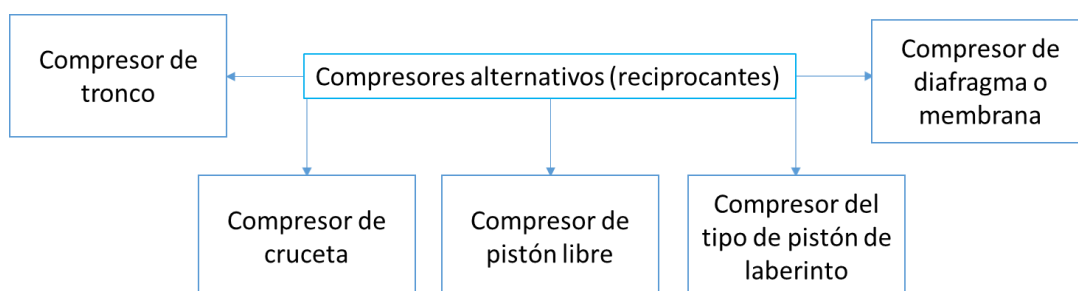


Figura 4.4.1-1. Tipos de compresores reciprocantes.

Compresor de tronco (trunk compressor): Este tipo de compresor es el más sencillo de su categoría, ya que usualmente comprende 1 etapa de compresión (ASA Co, s/f) y no presenta características constructivas especiales; ver Figura 4.4.1-2.

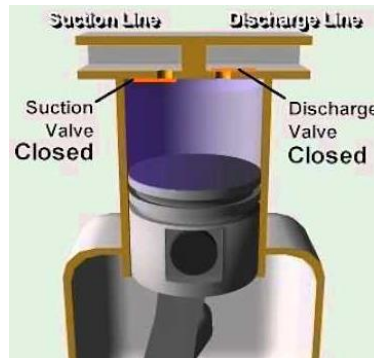


Figura 4.4.1-2. Compresor de tronco.

Compresor de cruceta (crosshead compressor): El corte de este tipo de compresor se puede observar en la Figura 4.4.1-3. A como se puede observar en la figura, se caracteriza por presentar cruceta y por ser de doble etapa de compresión (ASA Co, s/f).

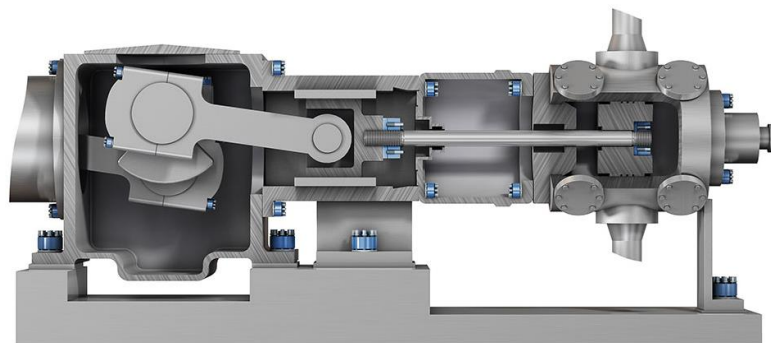


Figura 4.4.1-3. Compresor de cruceta.

Compresor de pistón libre (free piston compressor): En la Figura 4.4.1-4 se observa una unidad de pistón libre. La compresión de aire en estas unidades se logra mediante la combustión de una mezcla aire combustible en una cámara de combustión, que luego parte del aire comprimido se utiliza para comprimir nuevamente el aire dentro de la cámara de combustión. Estos compresores se caracterizan por no presentar conexión mecánica alguna (Jesús Jiménez, 2016).



Figura 4.4.1-4. Compresor de pistón libre.

Compresor del tipo de pistón de laberinto (labyrinth piston type compressor): Es un tipo de compresor en el cual la periferia del pistón contiene varios laberintos (roscas) labrados en su superficie (Figura 4.4.1-5) y mantiene la condición de hermeticidad gracias al efecto laberinto (JSW, The Japan Steel Works, LTD., 2014). La hermeticidad se puede mejorar en función del perfil de la rosca. El gas que entrega este compresor se encuentra en condición seca; es decir, no se encuentra contaminado por partículas de aceite; como resultado, este tipo de compresor es el más adecuado para manejar gases como N_2 (no tiene que estar contaminado por aceite), gases combustibles como O_2 y gases reciclados.

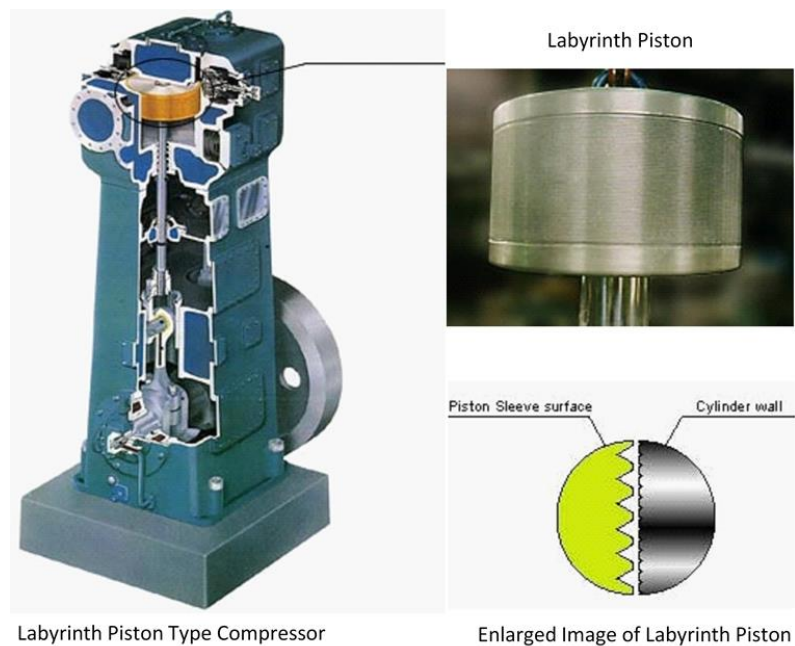


Figura 4.4.1-5. Compresor de pistón de tipo laberinto.

Compresores de diafragma o membrana (diaphragm compressor): Este es otro tipo de compresor libre de aceite. Su funcionamiento consiste en la actuación de una membrana flexible (Figura 4.4.1-6) que puede ser accionada mecánicamente o de forma hidráulica (Jesús Jiménez, 2016).

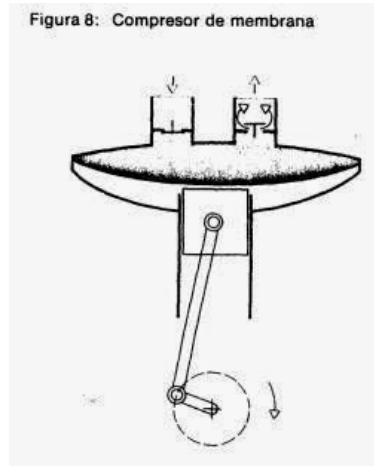


Figura 4.4.1-6. Compresor de diafragma o membrana.

Con base a lo descrito anteriormente, el objeto de estudio corresponde a un compresor de tronco (trunk compressor), ya que comprende una única etapa de compresión y presenta características constructivas sencillas.

4.4.2 Multietapas de compresión

Existen compresores que poseen varias etapas sucesivas de compresión; pueden ser 2, 3, 4, etc. Las ventajas que tiene esta característica constructiva son las siguientes:

- Disminuir la potencia requerida.
- Limitar las temperaturas del aire a la descarga.
- Limitar los diferenciales de presión.

El diagrama presión-volumen (también conocido como diagrama de indicador) de un compresor de una etapa se muestra en la Figura 4.4.2-1. Mientras menor sea el área

contenida dentro del diagrama p-v, menor será la cantidad de trabajo requerida para la realización de este (Bloch & Hoefner, 1996).

En la Figura 4.4.2-2 aparece un diagrama p-v de un compresor de doble etapa con inter-enfriamiento perfecto, en la que se puede observar una menor área del diagrama p-v (líneas gruesas), lo que conduce a una mayor eficiencia de la unidad y, por ende, menor consumo energético.

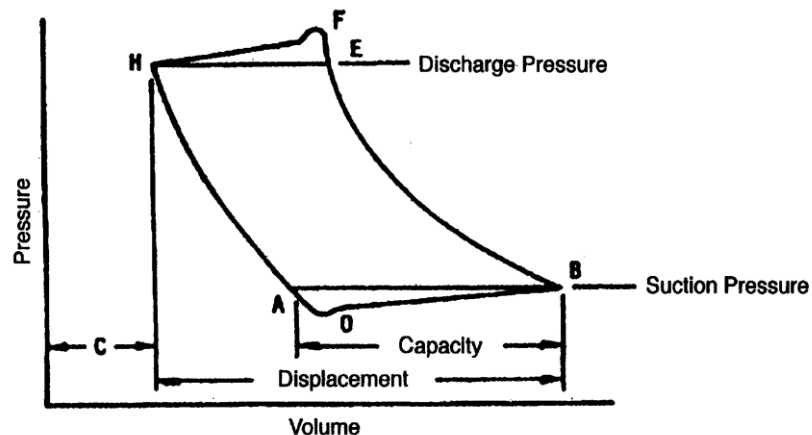


Figura 4.4.2-1. Diagrama presión-volumen de un compresor de una etapa.

Las menores temperaturas de descarga del aire son particularmente importantes en materia de seguridad (Bloch & Hoefner, 1996), y se consiguen por la particularidad de sucesión de procesos que tienen lugar en la unidad; en especial un proceso de calentamiento isobárico más corto y, seguido de este, un proceso de expansión distinto de una expansión adiabática (Figura 4.4.2-2). Cabe destacar que las menores temperaturas de descarga se consiguen también en ciclos reales, solo que los valores son un poco mayores como resultado de la generación de entropía en los procesos termodinámicos.

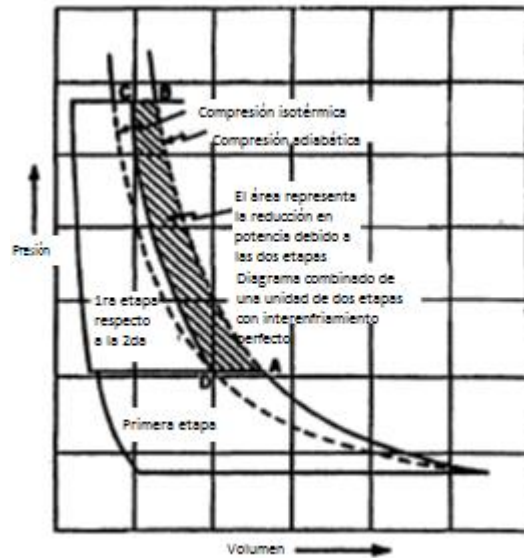


Figura 4.4.2-2. Diagrama teórico combinado de indicador de un compresor de doble etapa.

La presión de descarga se encuentra particularmente ligada a la temperatura de descarga del aire (para un proceso adiabático reversible); las unidades compresoras de multietapas, dada su particularidad de procesos, tienen mayores capacidades de presión de descarga para una determinada razón de temperaturas, tal y como se observa en la (Figura 4.4.2-3). La limitación en los diferenciales de presión ayuda a reducir los valores de esfuerzos y deformación de componentes como el bastidor, tren motriz y otras partes (Bloch & Hoefner, 1996).

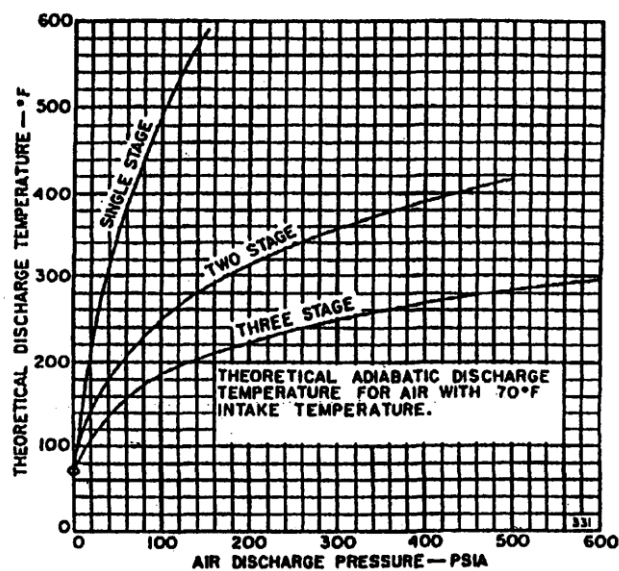


Figura 4.4.2-3. Temperatura teórica de descarga para compresores de 1,2 y 3 etapas.

El sistema de compresión Campbell Hausfeld; el objeto de estudio, posee únicamente una etapa de compresión. Como resultado, se requiere de mayor trabajo en comparación con unidades compresoras de varias etapas. Adicionalmente, las temperaturas y presiones de descarga son mayores, por lo que componentes como el bastidor, tren motriz, etc. se encuentran sometidos a valores mayores de esfuerzos y deformación.

4.4.3 Partes

Las principales partes de un compresor de aire reciprocante son las siguientes (Bloch & Hoefner, 1996):

Marco o caja del cigüeñal: Es un marco diseñado con apoyos adecuados para montar los cilindros del compresor, cigüeñal y otras partes que presentan movimiento y mantenerlas con correcta alineación, aún bajo los esfuerzos a los que son sometidas las piezas durante el funcionamiento.

Cigüeñal: Es un eje que posee codos y contrapesos y que, junto con la acción del mecanismo biela-manivela, permite la conversión del movimiento rectilíneo reciprocante de los pistones en movimiento rotatorio.

Cojinetes principales: Son los encargados de soportar el cigüeñal del compresor y, al mismo tiempo, permitir su rotación con la menor resistencia posible al rodamiento.

Cojinetes de biela: Son los encargados de unir la biela, por medio de la cabeza de biela, a las muñequillas del cigüeñal. Su labor consiste también en permitir el menor rozamiento posible y disminuir el desgaste en el cigüeñal y biela.

Biela: Es una barra articulada en dos puntos; uniendo en un punto el pie de biela con el bulón del pistón y, en el otro, la cabeza de biela con la muñequilla del cigüeñal. Por lo tanto, la biela une el pistón con el cigüeñal y es básicamente el elemento

fundamental en la conversión del movimiento rectilíneo reciprocante en movimiento rotatorio del cigüeñal.

Cilindros: Son agujeros labrados en un material donde se alojarán los pistones. Tienen como función servir de guía y soporte para los pistones. Algunos cilindros son de camisa de agua, ayudando a remover el calor proveniente de la compresión del aire.

Pistones: Son las piezas encargadas de reducir el volumen ocupado por el gas; es decir, elevar la presión del gas contenido en el cilindro, mediante movimientos rectilíneos reciprocantes.

Bulón: Es un eje que permite la conexión entre el pie de biela y el pistón; esto combinado con el cigüeñal y biela y, restringido por el cilindro, permite que se pueda convertir el movimiento rectilíneo en movimiento rotacional.

Tanque de almacenamiento: Este elemento constituye la fuente de acopio del aire, después de ser elevada su presión. Hay que tener especial cuidado en la fabricación de estos componentes ya que, si sus valores de resistencia no son los adecuados, se podría producir una explosión, causando daños a la infraestructura aledaña y, peor aún, a las personas cercanas al equipo de compresión.

Aceite: Este fluido es vital en los compresores de aire reciprocantes que son lubricados. Este elemento tiene tres funciones: limpiar, lubricar y enfriar.

Perno de aceite: Esta pieza, al ser removida, provee una entrada para el aceite del equipo durante los mantenimientos de este. En algunos equipos que carecen de medición de aceite, generalmente el nivel de aceite corresponde a la altura donde se aloja este perno.

Manómetro: Es un instrumento que permite la medición de presión manométrica en el tanque de almacenamiento; es decir, la diferencia de presión entre la presión absoluta del aire en el tanque y la de la atmosfera en ese lugar.

Presostato: Permite que el motor eléctrico entre o salga de operación cuando un determinado valor de presión se alcanza en el fluido contenido en el tanque de almacenamiento. En este caso, es un regulador on/off (Instrumentos WIKA, 2014).

Perno de purga: Esta pieza posee dos funciones: cerrar el tanque de almacenamiento por la parte de abajo y proveer de un mecanismo de purga de sustancias tales como agua, aceite, etc.

Válvula de alivio de presión: Esta pieza está diseñada para aliviar la presión cuando un fluido supera un determinado valor de presión. Su objetivo es evitar la explosión del sistema protegido (en este caso el tanque de almacenamiento) o evitar daños en la tubería por excesivos valores de presión (“Válvula de alivio de presión”, 2016).

Válvula anti-retorno (válvula check): El objetivo de esta válvula es cerrar por completo el paso de un fluido en un sentido, y permitir su circulación en otro. Se utiliza cuando se desea mantener a presión una tubería o un recipiente (“Válvula anti-retorno”, 2016).

Filtro de aire: La función de este filtro, a como su nombre lo indica, es separar del aire partículas de suciedad, polvo, tierra, arena; etc., que puedan significar una contaminación del aire a comprimir y/o malfuncionamiento o desgaste en las piezas del sistema de compresión de aire.

Regulador de presión del aire: Este elemento permite la regulación de presión del aire a la salida del tanque de almacenamiento; esto es, para adecuarla a los requerimientos de una aplicación en concreto.

Manguera: Este componente provee de una flexibilidad operacional al operario al momento de distribuir el aire comprimido, al mismo tiempo que amplía su rango de operación (dependiendo de la longitud de la manguera).

Herramienta neumática: Este dispositivo utiliza el aire comprimido para la aplicación que se requiere. Puede ser una pistola sopleteadora, taladro neumático o pistola para pintar.

La razón de detallar las funciones de cada componente se debe a que el sistema de compresión marca Campbell Hausfeld actualmente posee todos estos elementos, a excepción del regulador de presión del aire, filtro de aire y herramienta neumática. Las actividades de diagnóstico y mantenimiento integral comprendidas en el capítulo V irán encaminadas a detectar y resolver los problemas relacionados con estos componentes, por lo que es necesario conocer un poco sobre cada uno de ellos.

4.4.4 Mantenimiento

Podemos afirmar que el objetivo de la función de mantenimiento es conservar en buen estado y de la forma más económica posible el equipo, herramientas e instalaciones de una empresa, laboratorio o taller, de tal manera que estos se mantengan en operación y, al mismo tiempo, generando productos y servicios con la calidad deseada (“Administración del mantenimiento”, s/f).

Administración del mantenimiento:

Para afirmar que se está cumpliendo la administración del mantenimiento, es de carácter obligatorio cumplir con los siguientes aspectos:

Primero: Tenemos que mantener el equipo operando.

Segundo: El equipo tiene que funcionar de tal forma que se cumplan las especificaciones de calidad.

Tercero: Se tiene que lograr lo anterior de la forma más económica posible.

Para lograr estos 3 objetivos, la administración del mantenimiento debe hacer un uso óptimo de los siguientes elementos (“Administración del mantenimiento”, s/f):

- a) Personal.
- b) Equipo y herramientas.
- c) Repuestos y materiales.

Niveles de mantenimiento:

Existen cinco niveles de mantenimiento (Bloch & Hoefner, 1996). Estos son:

1. Mantenimiento reactivo o mantenimiento de descompostura (falla): Este tipo de mantenimiento incluye la reparación del equipo después de su fallo; en otras palabras, ocupa el equipo hasta que falle. Es no planeado, no deseado, costoso y usualmente no se puede evitar, aunque otros tipos de mantenimiento se hayan efectuado.
2. Mantenimiento de rutina: Este nivel incluye lubricación y una reparación proactiva. La lubricación deberá hacerse respetando un calendario establecido. La reparación proactiva consiste en una reparación de equipos basada en un nivel alto de mantenimiento. Esto permite determinar que, si el equipo no se repara, una avería ocurrirá.
3. Mantenimiento correctivo: Este nivel incluye el ajuste o la calibración del equipo. Esto permite mejorar la calidad o el desempeño del equipo. La necesidad de aplicar mantenimiento correctivo a un equipo proviene de observaciones de mantenimiento predictivo o preventivo.
4. Mantenimiento preventivo: Este proceso es continuo e incluye inspección periódica de acuerdo a un calendario. El objetivo es minimizar los problemas asociados a futuros mantenimientos y la necesidad de mantenimientos de falla.

5. Mantenimiento predictivo: Predice potenciales problemas mediante la detección sensorial en operaciones del equipo. Este tipo de mantenimiento monitorea las operaciones, diagnostica tendencias indeseables y determina con precisión problemas potenciales. En términos sencillos, un operario que escucha un cambio en el sonido que hace el equipo predice un problema potencial. Esto luego conlleva a un mantenimiento correctivo o uno de rutina.

Filosofías en el mantenimiento:

Hablando realísticamente, existen dos filosofías de mantenimiento que prevalecen en la industria (Bloch & Hoefner, 1996):

- No hacer nada hasta que el equipo deje de funcionar o una emergencia ocurra. El sistema de compresor de aire (o el equipo) es reparado lo más rápidamente o lo más económicamente posible y luego es enviado de vuelta al servicio. Inevitablemente, la siguiente emergencia será dentro de poco tiempo.
- Mantener el equipo en excelentes condiciones, optimizando tanto la confiabilidad como la disponibilidad del equipo. Los tiempos de parada para el mantenimiento preventivo son planeados, y la probabilidad de una avería (o emergencia) no esperada es minimizada.

La primera filosofía, algunas veces denominada como mantenimiento de falla, es raramente justificada en los aspectos económicos y de manejo de riesgo. Simplemente considerando el riesgo de seguridad debería convencer de lo peligroso que es este enfoque (Bloch & Hoefner, 1996).

La segunda filosofía, por su parte, probara ser más rentable (y a la vez beneficiosa) cuando sea usada en conjunto con un programa de mantenimiento predictivo implementado conscientemente (monitoreo y en base a tendencias).

Mantenimiento preventivo y su efectividad:

El mantenimiento no es una póliza de seguros ni una capa de seguridad, es un requerimiento para el éxito. Sin un mantenimiento preventivo efectivo, los equipos están destinados a fallar durante la operación.

Los sistemas deben ser mantenidos a su máximo nivel de desempeño; es por eso que la actividad de mantenimiento debe incluir inspección regular, limpieza, ajuste y reparación de equipos y sistemas. Las paradas de equipos ocurren como resultado de una operación indebida del equipo o fallas al implementar tareas básicas preventivas.

Por otro lado, desarrollar mantenimientos innecesarios y reparaciones deberían evitarse. Un ejemplo de esto es el hecho de overhauled equipos periódicamente cuando no es necesario; esto es un lujo muy costoso, algo que las empresas están renuentes a pagar.

Las reparaciones efectuadas en la base de emergencia son muy costosas en comparación con los mantenimientos efectuados de acuerdo a un calendario planeado. Incluso, aunque más difíciles de calcular, pero indudablemente altos, son los costos que incluyen la caída de los procesos productivos o el tiempo y costo laboral en tales eventos. Por si las consecuencias de un mantenimiento mal planeado fueran pocas, es mucho peor el impacto negativo que trae consigo las frecuentes paradas en el desempeño global de la planta, incluyendo el sutil efecto en la moral de los trabajadores, calidad del producto y costos de unidades (Bloch & Hoefner, 1996).

El mantenimiento preventivo incluye la rápida detección y tratamiento de las anomalías del equipo antes de que causen defectos o pérdidas. Son dos los aspectos destacados:

1. Inspección periódica.
2. Restauración planeada basada en los resultados de las inspecciones.

Cuando un programa de mantenimiento preventivo es desarrollado y manejado correctamente, es el mejor plan de mantenimiento disponible. La prueba de esto reside en las siguientes razones:

- Mejora la disponibilidad de la planta.
- Confiabilidad de equipamiento más alta.
- Mejor desempeño del sistema o costos operacionales y de mantenimiento reducidos.
- Mejora la seguridad.

Una vez que el sistema de compresión de aire sea restaurado, de poco servirá si no se planifica un régimen de mantenimiento preventivo orientado a la preservación del equipo. Esto se fundamenta en el hecho de que no es posible diseñar una máquina que sea libre de mantenimiento durante toda su vida útil, sobre todo cuando se presentan superficies con rozamiento relativo entre sí. El éxito de la preservación del sistema de compresión de aire está íntimamente relacionado con la efectividad del plan de mantenimiento preventivo que se lleve a cabo.

4.4.5 Sistema eléctrico

Hoy en día la electricidad es indispensable no solo para la industria, sino también para las necesidades humanas. Las industrias necesitan de la electricidad para controlar y dar vida a sus equipos, así como también ser la fuente principal de energía para sus instalaciones. Las maquinas eléctricas que gobiernan en la industria son: transformadores, alternadores y motores eléctricos. Se procederá a continuación a definir brevemente los motores eléctricos, así como también los dispositivos que frecuentemente los acompañan y protegen durante su funcionamiento.

4.4.5.1 Motor eléctrico

Un motor eléctrico (Figura 4.4.5-1) es un dispositivo que puede convertir energía eléctrica en mecánica (Stephen J. Chapman, 2012). Los motores eléctricos utilizan la acción de los campos magnéticos para la conversión de energía.

Es bien conocido que los tipos de corriente más conocidos son: corriente directa (cd) y la corriente alterna (ca). La primera no presenta una variación de su magnitud en el tiempo; es decir, es constante, mientras que la segunda varía senoidalmente con el tiempo. La Figura 4.4.5-2 muestra las gráficas de la corriente alterna y corriente directa.

Los motores de ca convierten energía eléctrica de ca en energía mecánica (Stephen J. Chapman, 2012). Existen dos clases de motores eléctricos:

- Motor eléctrico síncrono: La corriente de campo magnético la suministra una fuente de potencia externa.
- Motor eléctrico asíncrono (o motor eléctrico de inducción): La corriente de campo magnético se suministra a sus devanados por medio de inducción magnética.

Los motores eléctricos son de suma importancia para la civilización. En nuestros hogares, los motores eléctricos hacen funcionar a los refrigeradores, equipos de aire acondicionado, congeladores, aspiradoras, ventiladores, etc.; mientras que en los talleres (Figura 4.4.5-3) suministran la fuerza motriz para casi todas las herramientas; por ejemplo: compresores, esmeriladoras, tornos, fresadoras, taladros, entre otros.

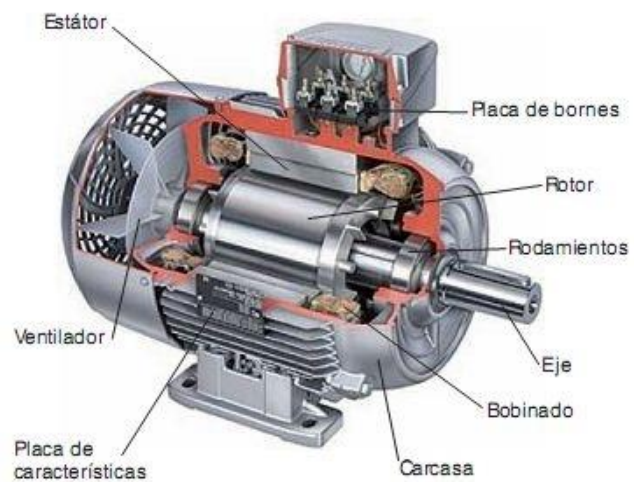


Figura 4.4.5-1. Motor eléctrico y sus componentes.

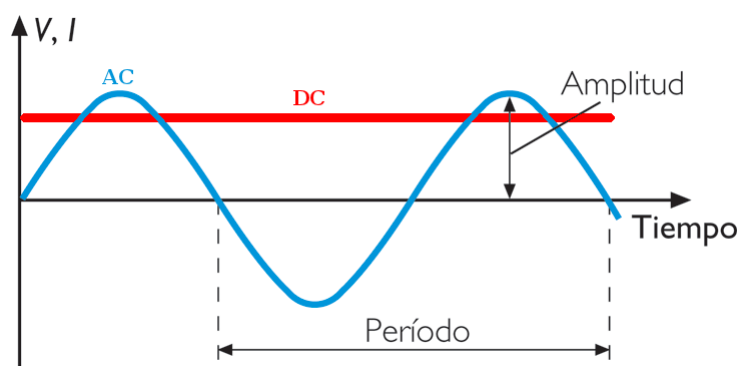


Figura 4.4.5-2. Funciones de la corriente alterna (AC) y corriente directa (DC).



Figura 4.4.5-3. Esmeriladora Bosch.

4.4.5.2 Circuito de maniobra eléctrica

Un circuito de maniobra eléctrica (Figura 4.4.5-4) es un sistema compuesto por: breaker, contactor, magneto térmico y un seccionador. La función de cada uno de ellos se explica brevemente a continuación (“Seccionador”, s/f).

Breaker: Dispositivo diseñado para abrir y cerrar el circuito de forma manual, y para abrir el circuito automáticamente cuando se excede un valor predeterminado de corriente, sin daños al mismo cuando esta se encuentra dentro de su rango de tolerancia.

Contactor: Es un dispositivo de mando que permite abrir y cerrar el circuito de carga. Puede ser gobernado a distancia y actúa de forma similar a un interruptor.

Magneto térmico: Es un dispositivo utilizado en la protección de circuitos eléctricos contra cortocircuitos y sobrecargas (Juan Luis Hernández, 2016). Estos sustituyen a los fusibles y tienen la ventaja de que no hay que cambiarlos una vez han cumplido su función.

Seccionador: Permite la apertura del circuito de carga independientemente de que este circuito esté conectado a la red de alimentación. En otras palabras, aísla eléctricamente una instalación o equipo de la red de alimentación.

No es recomendable que componentes eléctricos funcionen sin una debida protección, a como se encontraba inicialmente el compresor de aire. La implementación de un circuito de maniobra eléctrica brindaría mayor seguridad a las personas cercanas al sistema de compresión de aire, tanto durante su funcionamiento como en su mantenimiento; al mismo tiempo que protegería los equipos eléctricos (motor eléctrico, presostato y cables) de excesivas y dañinas corrientes, extendiendo la vida útil de las partes eléctricas y, por consiguiente, del sistema.

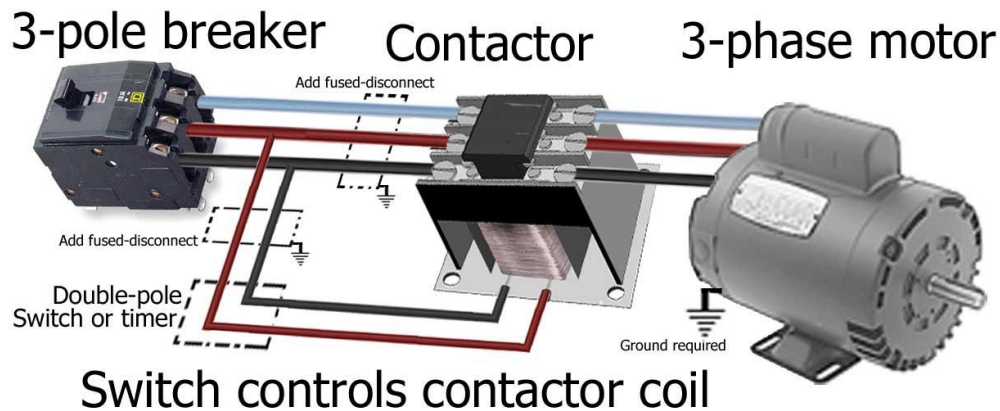


Figura 4.4.5-4. Circuito de maniobra eléctrica para un motor eléctrico (trifásico en este caso).

V. Análisis y presentación de resultados

En el presente acápite se mostrará lo concerniente al desarrollo del tema de tesis para exponer el diagnóstico, mantenimiento integral, componentes añadidos, líneas futuras, análisis económico y plan de mantenimiento del sistema de compresión de aire marca Campbell Hausfeld.

5.1 Diagnóstico

En esta etapa se realizó el diagnóstico de los sistemas del equipo de compresión de aire, los cuales son: sistema eléctrico, sistema mecánico y sistema de instrumentación y control. A continuación, se detallan los resultados del diagnóstico para cada sistema del equipo.

5.1.1 Sistema eléctrico

Como primer paso, se conectó el motor eléctrico a su fuente de tensión alterna bifásica de 240 voltios, 60 Hz. Se identificó que el motor no arrancaba y se procedió a iniciar el diagnóstico de cada una de las partes para la determinación de las fallas. El proceso de identificación de fallas atendió dos enfoques: visual y de medición eléctrica.

- Devanados:

La Figura 5.1.1-1 muestra el estator del motor eléctrico. Según puede observarse en esa figura, los devanados no se encuentran quemados porque su color no es negrizco; mantienen su tonalidad de cobre. Cabe destacar que el color negro que se observa en la misma figura corresponde a pintura. La resistencia eléctrica obtenida del devanado principal es de 1.4Ω , tal como se aprecia en la Figura 5.1.1-2. En cuanto al devanado auxiliar, no se pudo medir esta resistencia debido al rango de medición del multímetro. Es importante mencionar que para hacer estas mediciones es necesario contar con un microhmetro. Debido a las observaciones anteriores, se puede afirmar que los devanados principal y auxiliar se encuentran en buenas condiciones (una prueba de arranque terminaría de probar esta afirmación).

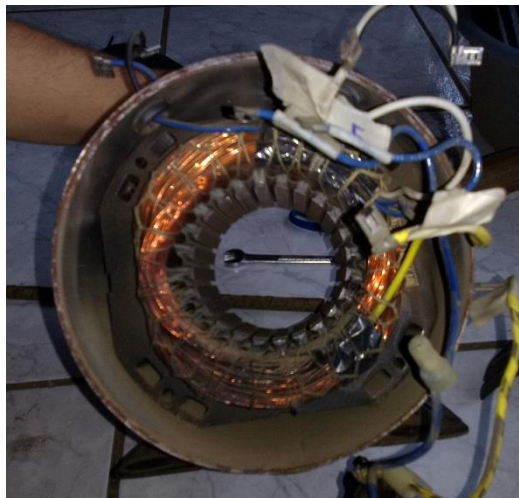


Figura 5.1.1-1. Devanados del estator del motor eléctrico Century.



Figura 5.1.1-2. Medición de la resistencia eléctrica en el devanado principal.

- Capacitor de marcha:

De acuerdo a lo observado, el capacitor de marcha no presenta fugas de aceite, *Figura 5.1.1-3*. La capacitancia que se midió fue de 14.99 μF , presentando prácticamente su valor nominal de capacitancia, *Figura 5.1.1-4*. Sin embargo, fue sometido a un uso continuo, por lo que se recomienda su reemplazo.



Figura 5.1.1-3. Vista de planta del capacitor de marcha.



Figura 5.1.1-4. Especificaciones técnicas del capacitor de marcha.

- Capacitor de arranque:

Por inspección, este capacitor presenta fuga de aceite,

. Su valor actual de capacitancia es de 40 μF (según mediciones con multímetro), una cantidad bastante menor que su valor nominal, el cual debe oscilar entre 145 μF y 175 μF . Es de vital importancia reemplazarlo para asegurar el arranque del motor eléctrico.



Figura 5.1.1-5. Fuga de dieléctrico del capacitor de arranque.

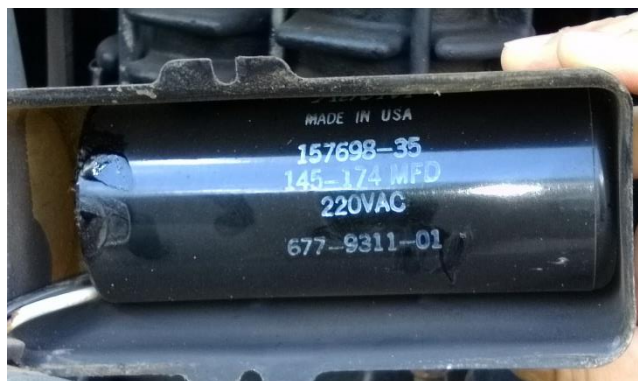


Figura 5.1.1-6. Especificaciones técnicas del capacitor de arranque.

- Relé centrífugo:

Presenta un depósito de suciedad y óxido (*Figura 5.1.1-7*) que dificulta en gran parte el movimiento relativo entre este (el relé) y el eje, empeorando su funcionamiento. No se observaron componentes rotos.



Figura 5.1.1-7. Relé centrífugo del motor eléctrico Century.

- Conexiones eléctricas del laboratorio de máquinas herramientas:

La mayor parte de los toma corriente en este local no funcionan, excepto una. Se recomienda que cerca de donde esté ubicado el sistema de compresión de aire, exista una unidad de toma corriente en estado funcional.

Por otro lado, se desconoce dónde está la conexión a tierra del panel eléctrico del laboratorio. Esto es particularmente importante para prevenir descargas eléctricas que pudieran atentar contra la seguridad de las personas. Se recomienda, de forma

general, que se mejoren las instalaciones eléctricas de este laboratorio para evitar futuras complicaciones.

- Maniobra eléctrica del sistema de compresión de aire:

El sistema de compresión de aire carece de un circuito de maniobra eléctrica que permita desconectar y, al mismo tiempo, proteger a las instalaciones eléctricas del equipo de los excesivos daños provocados por corrientes excesivas y de cortocircuito. Se recomienda la instalación de un centro de carga con su respectivo break y alambres del calibre adecuado.

5.1.2 Sistema mecánico

El segundo paso del diagnóstico consistió en evaluar las piezas que componen el sistema mecánico, identificando potenciales fallas.

- Polea impulsada acanalada:

La polea acanalada del compresor y su respectiva cuña no presentan grietas observables a simple vista (*Figura 5.1.2-1* y *Figura 5.1.2-2*, respectivamente). El prisionero aparentemente se encuentra en buen estado, *Figura 5.1.2-3*.



Figura 5.1.2-1. Polea impulsada acanalada del compresor marca Campbell Hausfeld.



Figura 5.1.2-2. Cuña de polea acanalada del compresor.

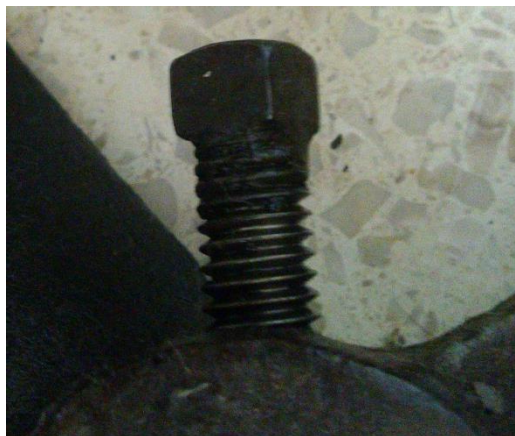


Figura 5.1.2-3. Prisionero de polea acanalada del compresor.

- Caja del cigüeñal:

Esta pieza tiene gran presencia de suciedad y de depósitos de aceite (*Figura 5.1.2-4*). Su junta está totalmente deteriorada y su rodamiento de agujas se encuentra en aparente buen estado (*Figura 5.1.2-5* y *Figura 5.1.2-6*, respectivamente). Cabe destacar que no se apreció falla estructural alguna en la pieza o en sus pernos.



Figura 5.1.2-4. Suciedad y depósitos de aceite presentes en la caja del cigüeñal.



Figura 5.1.2-5. Junta deteriorada de la caja del cigüeñal.



Figura 5.1.2-6. Rodamiento de agujas de la caja del cigüeñal.

- Tapa de caja del cigüeñal:

Esta pieza presenta cantidades considerables de suciedad y deposiciones de aceite. Su rodamiento de agujas está en aparente buen estado (*Figura 5.1.2-7*). Existe cierto grado de deterioro de su junta, a como puede observarse en la *Figura 5.1.2-8*.

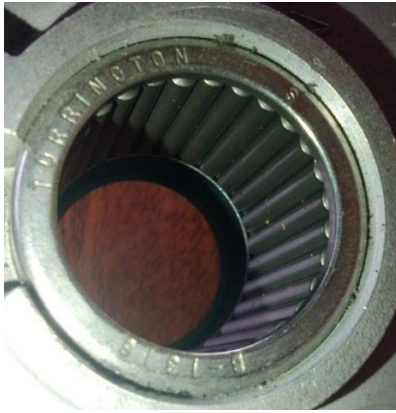


Figura 5.1.2-7. Rodamiento de agujas de la tapa del cigüeñal.



Figura 5.1.2-8. Junta de tapa del cigüeñal.

- Bloque de cilindros:

Se observó (y también auxiliándome del tacto) que las superficies de los cilindros no se encuentran desgastadas y conservan un buen acabado superficial, tal y como se aprecia en la Figura 5.1.2-9. No se detectó ninguna falla estructural en esta pieza.



Figura 5.1.2-9. Bloque de cilindros.

- Cabeza:

Las válvulas de esta pieza se encontraban en buen estado (*Figura 5.1.2-10*), aunque impregnadas de aceite y suciedad. El o-ring está muy deteriorado y solo cubre parcialmente la cavidad. La junta del conjunto bloque-cabeza (*Figura 5.1.2-11*) está deteriorada y posiblemente hecha de un material que no corresponde. No se logró apreciar fallas o grietas en la integridad estructural de esta pieza o de sus pernos.



Figura 5.1.2-10. Suciedad y deposiciones de aceite en la cabeza.



Figura 5.1.2-11. Junta en mal estado del conjunto bloque-cabeza.

- Pistones:

Los pistones y anillos de pistón (*Figura 5.1.2-12*) mantienen su integridad estructural. La cabeza de los pistones (*Figura 5.1.2-13*) se encuentra un poco sucia.



Figura 5.1.2-12. Anillos de pistón.



Figura 5.1.2-13. Cabezas de pistones.

- Bielas:

No se identificó alguna grieta o algún desperfecto estructural en esta pieza (*Figura 5.1.2-14*). Los cojinetes de biela están en buen estado y no presentan desgaste apreciable, tal y como se observa en la *Figura 5.1.2-15*. No se aprecia alguna vulnerabilidad en la integridad del bulón. Existe una buena lubricidad entre el pie de biela y el bulón del pistón (*Figura 5.1.2-16*). Los pernos de biela se encuentran en buen estado y sin ninguna debilidad aparente en su integridad, a como puede observarse en la *Figura 5.1.2-17*.



Figura 5.1.2-14. Bielas de pistones.



Figura 5.1.2-15. Cojinetes de bielas.



Figura 5.1.2-16. Pie de biela y bulón de pistón.



Figura 5.1.2-17. Pernos de biela.

- Cigüeñal:

Las muñequillas y contrapesos del cigüeñal están en buen estado, a como muestra la *Figura 5.1.2-18*. No se observaron grietas u cortes en la superficie del cigüeñal; únicamente se identificaron pequeñas penetraciones que corresponden al lugar donde se localiza y aprieta el prisionero de la polea acanalada del compresor (*Figura 5.1.2-19*). La integridad estructural del cigüeñal no presenta riesgos.



Figura 5.1.2-18. Muñequillas y contrapesos del cigüeñal.



Figura 5.1.2-19. Pequeñas penetraciones en la superficie del cigüeñal.

- Aceite:

El aceite se encontraba deteriorado, con un color gris negrizco.

5.1.3 Sistema de instrumentación y control

Este sistema consta de dos componentes: presostato y manómetro.

- Presostato:

Como primera tarea se procedió a verificar las conexiones del presostato (*Figura 5.1.3-1*) y la continuidad y/o discontinuidad entre las líneas del presostato cuando el circuito se abre o cierra. No se detectó problemas en estos aspectos; sin embargo, se presentan fugas de aire por el diafragma cuando el equipo está en funcionamiento, así como también cuando el presostato corta el suministro eléctrico al motor eléctrico. Se recomienda, dado su dificultad de reparación, su reemplazo.



Figura 5.1.3-1. Líneas del presostato.

- Manómetro:

Este dispositivo de medición ya tiene muchos años y, aunque se encuentre en buen estado (Figura 5.1.3-2), se aconseja reemplazarlo para que la lectura de las presiones manométricas por parte del operario sea lo más correcta posible.



Figura 5.1.3-2. Manómetro para la medición de diferencia de presiones.

- Válvula de alivio de presión (válvula de seguridad):

La válvula de alivio de presión se muestra en la Figura 5.1.3-3. Este dispositivo de seguridad ya tiene muchos años acumulados, sin mencionar el hecho de que estuvo operando por varios años mientras el sistema de compresión de aire estuvo activo. Se recomienda su reemplazo para que, si en algún dado caso el presostato no corta

el suministro eléctrico a una determinada presión del tanque, la presión no siga incrementando peligrosamente.



Figura 5.1.3-3. Válvula de alivio de presión.

- Válvula anti-retorno (válvula check):

La válvula anti-retorno se muestra en la Figura 5.1.3-4. Este dispositivo ya tiene muchos años de exposición a la intemperie y ya no permite el flujo en una sola dirección, sino que existe un reflujo. Se recomienda su reemplazo.



Figura 5.1.3-4. Válvula anti-retorno (válvula check).

5.1.4 Sistema de almacenamiento de aire

El diagnóstico de este sistema comprendió los siguientes elementos: tanque de almacenamiento de aire, perno de purga, tubería de cobre y manguera.

- Tanque de almacenamiento de aire:

El tanque se encuentra todavía húmedo, sin aire a presión. No se observa ninguna falla o grieta estructural en el tanque. Se encuentra muy sucio, impregnado de aceite en la parte superior y su pintura está deteriorada, Figura 5.1.4-1.



Figura 5.1.4-1. Tanque de almacenamiento de aire.

- Perno de purga:

La cabeza hexagonal de este perno (Figura 5.1.4-2) está deformada, por lo tanto, puede presentarse problemas al momento de apretar o aflojar el perno. Se recomienda su reemplazo.



Figura 5.1.4-2. Perno de purga.

- Tubería de cobre:

La tubería de cobre ya tiene muchos años (Figura 5.1.4-3) y, aunque probablemente se encuentre en un estado aceptable y funcional, es mejor reemplazarla para evitar complicaciones en la seguridad de las personas y en el funcionamiento del sistema de compresión de aire.



Figura 5.1.4-3. Tubería de cobre del sistema de compresión de aire.

- Manguera:

La manguera del sistema de compresión de aire, al igual que muchas otras piezas, lleva buen tiempo en servicio y peor aún, expuesta a la intemperie (Figura 5.1.4-4). Adicionalmente, la longitud de esta no es suficiente para abarcar todas las maquinas del laboratorio de máquinas herramientas, por lo que se recomienda su reemplazo.

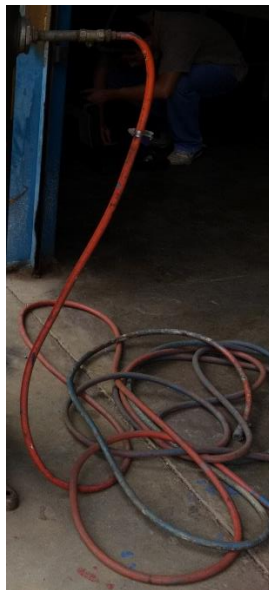


Figura 5.1.4-4. Manguera del sistema de compresión de aire.

5.2 Mantenimiento integral y puesta en marcha del sistema de compresión de aire.

Esta fase comprendió dos tareas: mantenimiento integral del equipo y su maniobra eléctrica.

5.2.1 Mantenimiento integral del equipo

Esta actividad estaba destinada a la preservación de los subsistemas del compresor de aire, los cuales se muestran en la Figura 4.4.1-1. Los resultados del mantenimiento de cada subsistema se detallan a continuación.

5.2.1.1 Sistema eléctrico

La actividad de mantenimiento en este sistema estaba dirigida a los siguientes componentes: motor eléctrico, capacitor de marcha, capacitor de arranque y relé centrífugo.

- Motor eléctrico:

El primer paso consistió en la limpieza y remoción de suciedad de terminales eléctricas; esto con el objetivo de reducir la resistencia eléctrica asociada a estos (Figura 5.2.1-1 y Figura 5.2.1-2). Seguido de esto, se procedió a limpiar la superficie interna de la carcasa y lijar la superficie externa (incluyendo la parte del rotor) de la misma para su posterior aplicación de pintura, tal y como se aprecia desde la Figura 5.2.1-3 hasta la Figura 5.2.1-6. Adicionalmente, el rodamiento de bolas del rotor se re-engrasó con grasa (a base de bentona) específica para rodamientos.



Figura 5.2.1-1. Terminales eléctricas del estator.



Figura 5.2.1-2. Terminales de espada de los alambres del estator.



Figura 5.2.1-3. Superficie externa de carcasa lijada y terminales del estator.



Figura 5.2.1-4. Superficie externa de carcasa pintada.



Figura 5.2.1-5. Tapa de motor eléctrico.



Figura 5.2.1-6. Rotor del motor eléctrico.

- Capacitor de marcha:

Si bien es cierto que la capacitancia de este capacitor estaba en valores correctos, había sido sometido a varios ciclos de carga, por lo que su reemplazo era necesario. Se adquirió 1 unidad de “capacitor de marcha 15 μ F 370 V” (Figura 5.2.1-7) y se procedió a su instalación. También se lijó y pintó la caja de este capacitor (Figura 5.2.1-8).



Figura 5.2.1-7. Capacitor de marcha para el motor eléctrico.



Figura 5.2.1-8. Caja de capacitor de marcha.

- Capacitor de arranque:

El capacitor de arranque del motor eléctrico se encontraba dañado, ya que presentaba fugas de fluido y su capacitancia estaba muy por debajo de su valor nominal. Debido a estas razones, su reemplazo era necesario. Se adquirió 1 unidad de “capacitor de arranque 145-175 μ F 220/250 V” (Figura 5.2.1-9) y se procedió a su instalación. Adicionalmente, se lijó y pintó la caja de este capacitor (Figura 5.2.1-10).



Figura 5.2.1-9. Capacitor de arranque del motor eléctrico.



Figura 5.2.1-10. Caja de capacitor de arranque.

- Relé centrífugo:

Esta pieza presentaba mucha resistencia al movimiento relativo, producto de las capas de suciedad y óxido localizadas en la superficie del eje del rotor. Como consecuencia de esto, la operación de este relé se dificultaba en gran medida.

El primer paso fue limpiar el relé y la superficie del eje donde se localiza el relé con gas kerosene (por su poder detergente), haciendo uso de una broca de cepillo de alambre y una brocha. Seguido de esto se aplicó aceite SAE 80W-90 entre el relé y la superficie del eje (Figura 5.2.1-11), distribuyendo el lubricante por toda la superficie. A continuación se hizo una prueba y la resistencia al movimiento disminuyó enormemente.

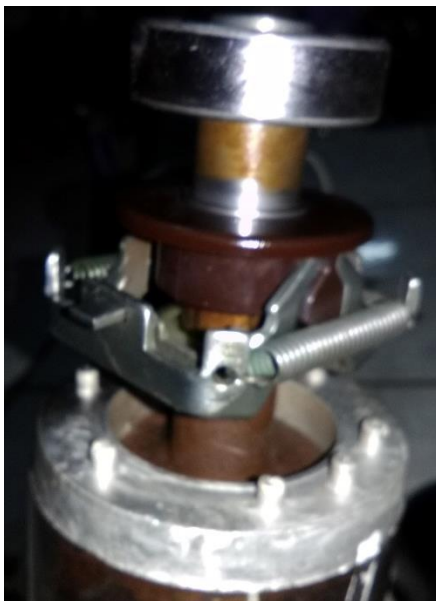


Figura 5.2.1-11. Relé centrífugo del rotor.

5.2.1.2 Sistema mecánico

La tarea de mantenimiento de este sistema estaba encaminada a las siguientes piezas: caja del cigüeñal, tapa de caja del cigüeñal, bloque de cilindros, cabeza, pistones, bielas y cigüeñal.

- Caja del cigüeñal:

La pintura de la superficie externa se eliminó mediante la acción de cepillado, dejando dicha superficie del color original del metal, tal como se observa en la Figura 5.2.1-12. Adicionalmente, las deposiciones de aceite y suciedad se removieron (Figura 5.2.1-13). Se adquirió una nueva junta de estanqueidad y se limpió la superficie donde esta se coloca (Figura 5.2.1-14 y Figura 5.2.1-13, respectivamente).

La frecuencia de cambio de aceite para esta pieza está en dependencia del grado de limpieza de la atmósfera que rodea al compresor. Es recomendable que el aceite sea drenado mientras esta caliente y, posteriormente, limpiar la caja del cigüeñal con trapos libres de pelusa. Se pueden usar limpiadores disolventes pero el uso de disolventes inflamables queda rotundamente prohibido (Bloch & Hoefner, 1996).



Figura 5.2.1-12. Superficie externa de la caja del cigüeñal.



Figura 5.2.1-13. Vista de planta de la caja del cigüeñal.

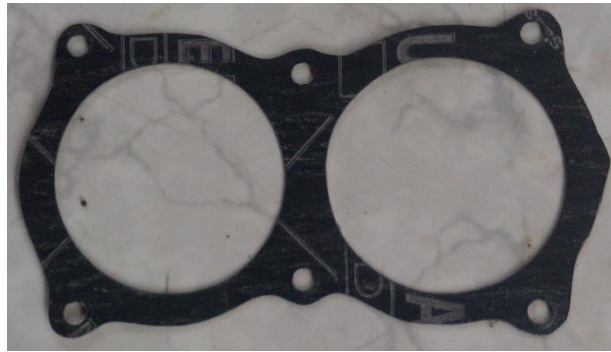


Figura 5.2.1-14. Junta de estanqueidad del conjunto bloque-caja del cigüeñal.

- Tapa de caja del cigüeñal:

La pintura de la superficie externa se removió gracias a la acción de cepillado, dejando que el metal conservara su color original, tal como se observa en la Figura 5.2.1-15. De la misma forma, se logró limpiar la superficie interna de la tapa mediante la acción de cepillado (Figura 5.2.1-16). Se adquirió una nueva junta de estanqueidad y se limpió la superficie donde esta se coloca (Figura 5.2.1-17).



Figura 5.2.1-15. Superficie externa de la tapa del cigüeñal.



Figura 5.2.1-16. Superficie interna de la tapa del cigüeñal.



Figura 5.2.1-17. Junta de estanqueidad de la tapa del cigüeñal.

- Bloque de cilindros:

El mantenimiento de esta pieza consistió básicamente en la limpieza y cepillado de sus superficies externas (incluyendo las superficies donde se sitúan las juntas de estanqueidad), tal como se muestra en la Figura 5.2.1-18 y Figura 5.2.1-19).



Figura 5.2.1-18. Bloque de cilindros.



Figura 5.2.1-19. Vista de planta del bloque de cilindros.

- Cabeza:

Este componente se vio sujeto a varias actividades; tales como: limpieza y cepillado de sus superficies y válvulas (Figura 5.2.1-20 y Figura 5.2.1-21), instalación de un nuevo o-ring (Figura 5.2.1-21) y adquisición de nueva junta de estanqueidad del conjunto bloque de cilindros-cabeza (Figura 5.2.1-22).



Figura 5.2.1-20. Superficie inferior de la cabeza y sus válvulas.

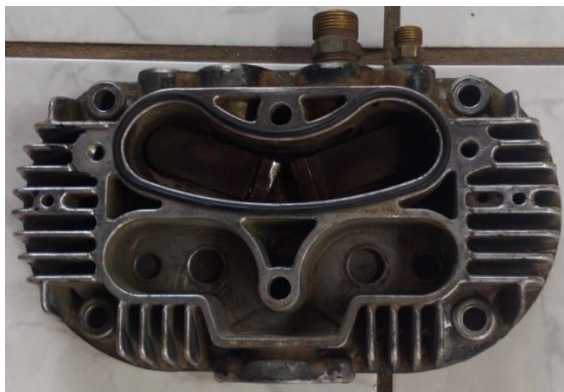


Figura 5.2.1-21. Vista superior de cabeza y o-ring instalado.



Figura 5.2.1-22. Junta de estanqueidad del conjunto bloque de cilindros-cabeza.

- Pistones:

Estas piezas fueron sometidas a una limpieza con gas kerosene (Figura 5.2.1-23); eso incluye a los anillos de los pistones (Figura 5.2.1-24), conjunto biela-bulón (Figura 5.2.1-25), cojinetes de biela (Figura 5.2.1-26) y pernos de biela (Figura 5.2.1-27).



Figura 5.2.1-23. Cabeza de pistón.



Figura 5.2.1-24. Anillos de pistón.



Figura 5.2.1-25. Conjunto biela-bulón.



Figura 5.2.1-26. Cojinetes de biela.



Figura 5.2.1-27. Pernos de biela.

- Cigüeñal:

Esta pieza siguió el mismo proceso que los pistones; es decir, fue sometida a una limpieza profunda mediante la acción de gas kerosene. El cigüeñal se observa en la Figura 5.2.1-28 y Figura 5.2.1-29.

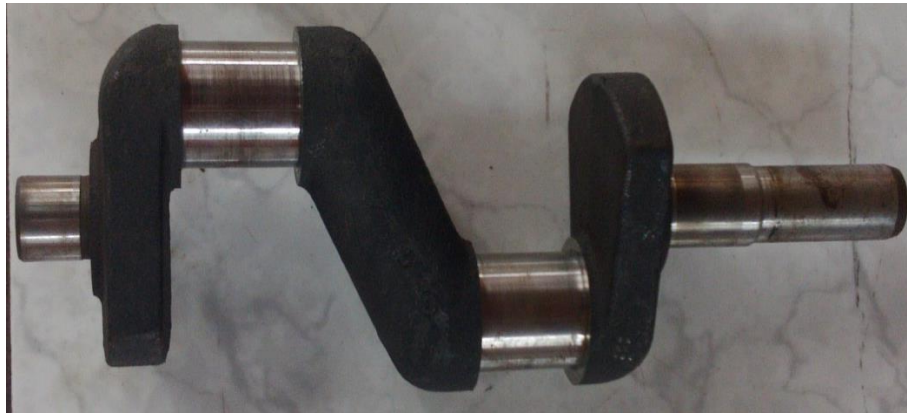


Figura 5.2.1-28. Cigüeñal visto desde una perspectiva superior inclinada.



Figura 5.2.1-29. Cigüeñal visto desde una perspectiva lateral inclinada.

5.2.1.3 Sistema de instrumentación y control

Este sistema consta de dos componentes: presostato y manómetro.

- Presostato:

A como puede observarse a partir de la Figura 5.2.1-30 hasta la Figura 5.2.1-34, el presostato fue reemplazado por uno marca Condor, cuya capacidad es de 125 psi. La razón de este cambio fue el hecho de que el anterior presostato funcionó durante varios años (siete, aproximadamente) y estuvo sometido a un proceso acelerado de deterioro como consecuencia de su uso y de la atmósfera en la que se encontraba. Este nuevo presostato permitirá eliminar las fugas de aire cuando el sistema de compresión de aire está detenido, logrando así conservar el aire a presión.

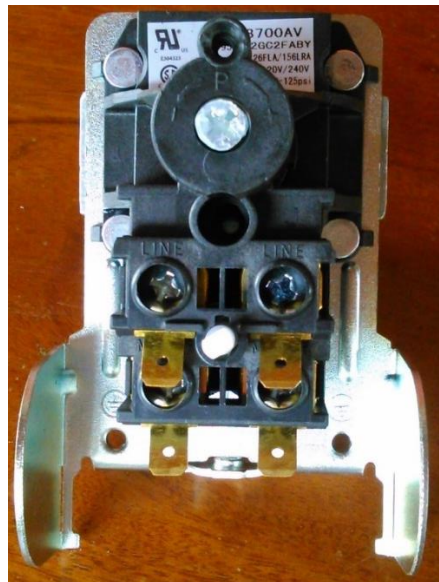


Figura 5.2.1-30. Interior del presostato.



Figura 5.2.1-31. Terminales de tierra del presostato.



Figura 5.2.1-32. Switch del presostato.

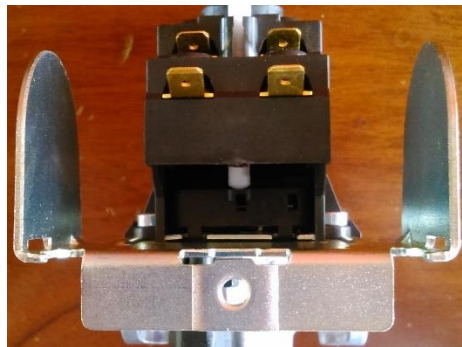


Figura 5.2.1-33. Alojamiento de cable de alimentación al motor (izquierda) y cable de alimentación al circuito (derecha).



Figura 5.2.1-34. Válvula de descarga del presostato.

- Manómetro:

El manómetro operó durante 7 años aproximadamente, bajo un régimen de uso continuo, por lo que es probable que la fatiga del elemento elástico del manómetro repercuta enormemente en la medición de la presión diferencial. Por esta razón se adquirió un manómetro SEAL FAST (Figura 5.2.1-35) con capacidad de 200 psi (1400 kPa o 1.4 MPa), con el objetivo de reemplazar el manómetro ya existente en el

sistema de instrumentación y así asegurar lecturas correctas de presión (dentro del rango de error) que no pongan en peligro la seguridad de las personas.



Figura 5.2.1-35. Manometro SEAL FAST de 200 psi.

- Válvula de alivio de presión:

Debido a motivos de seguridad (en caso de que la presión en el tanque alcance los 140 psi) y por razones de confiabilidad, esta pieza se reemplazó por una nueva (Figura 5.2.1-36)



Figura 5.2.1-36. Válvula de alivio de presión de 140 psi.

- Válvula anti-retorno (válvula check):

Debido a motivos de retorno de aire y, por consiguiente, de un grado muy alto de carga al motor (originado por el aire a presión proveniente del tanque), esta pieza tuvo que ser reemplazada por una nueva (Figura 5.2.1-37).



Figura 5.2.1-37. Válvula anti-retorno (válvula check).

5.2.1.4 Sistema de almacenamiento y distribución de aire

La tarea de mantenimiento de este sistema estaba dirigida a los siguientes componentes: tanque de almacenamiento de aire, regulador de presión del aire y sus acoples al tanque, perno de purga, tubería de cobre, manguera y pistola sopleteadora.

- Tanque de almacenamiento de aire:

Este componente se limpió y se lijó con una broca de cepillo de alambre, removiendo pintura y residuos de aceite sobre su superficie. Seguido de esto se procedió a su pintura, a como puede observarse en la Figura 5.2.1-38. El tanque de almacenamiento de aire listo para su ensamble se muestra en la Figura 5.2.1-39.



Figura 5.2.1-38. Procedimiento de pintado del tanque de almacenamiento de aire.



Figura 5.2.1-39. Tanque de almacenamiento de aire.

- Regulador de presión del aire y sus acoples al tanque:

Originalmente, el sistema de compresión de aire carecía de este elemento. Se adicionó debido a que, mediante este, se puede regular la presión de salida del aire del tanque y adecuarlo a la aplicación en la que se requiere el aire comprimido (Figura 5.2.1-40).

Para adaptar este regulador a la rosca del tanque de almacenamiento fue necesaria la adquisición de acoples, tal y como se aprecia en la Figura 5.2.1-41.



Figura 5.2.1-40. Regulador de presión del aire a la salida del tanque.



Figura 5.2.1-41. Acoples del regulador de presión de aire con el tanque de almacenamiento.

- Perno de purga:

Por razones de seguridad y teniendo en cuenta que esta pieza estuvo expuesta a varios ciclos de carga, se reemplazó el anterior perno de purga por uno nuevo (Figura 5.2.1-42).



Figura 5.2.1-42. Perno de purga.

- Tubería:

Por razones de seguridad y con un enfoque de reducción de riesgo, se decidió reemplazar la tubería anterior por una nueva tubería de cobre, como se muestra en la Figura 5.2.1-43.



Figura 5.2.1-43. Tubería de cobre: del compresor al presostato (arriba), del compresor al tanque (abajo).

- Manguera:

La manguera a utilizar (Figura 5.2.1-44) es un poco más larga que la anterior en aproximadamente 10 ft (pies). Esto se traduce en un radio de operación de 35 ft aproximadamente, lo que le confiere al sistema de compresión de aire mayor cobertura a las máquinas del laboratorio de máquinas herramientas.



Figura 5.2.1-44. Manguera para el transporte del aire comprimido.

- Pistola sopleteadora:

Este accesorio se le agregó a la manguera con el objetivo de controlar manualmente los tiempos de salida del aire comprimido (Figura 5.2.1-45).



Figura 5.2.1-45. Pistola sopleteadora.

5.2.2 Maniobra eléctrica

Para asegurar la protección del motor eléctrico es de suma importancia dimensionar los componentes de la maniobra eléctrica (cables y breaker) de acuerdo a las características nominales del motor. Los pasos para el dimensionamiento se presentan a continuación.

Paso 1:

Se conoce, por medio de la carta técnica del motor eléctrico, que su potencia es de 5 hp, es de naturaleza monofásica y el valor de la tensión entre sus terminales debe de ser de 230 Volts, aproximadamente. Según la Tabla 5.2.2-1 y, de acuerdo a los datos del motor, la corriente a máxima carga es de 28 Amperes.

Paso 2:

El siguiente paso es especificar el máximo ajuste de cortocircuito para el motor; esto se puede observar en la Tabla 5.2.2-2. Para encontrar la capacidad mínima del breaker para este motor se procede a multiplicar el valor de la corriente a máxima carga (28 Amperes) por el porcentaje encontrado anteriormente (175%); así:

$$C_M = (28 \text{ Amperes}) \times (1.75) = 49 \text{ Amperes.}$$

Por lo tanto, la capacidad mínima del breaker debe ser de 49 Amperes. Debido a la ausencia de breakers de 50 Amperes en las casas comerciales, se seleccionó un breaker de 60 Amperes (por ser el inmediato superior); por consiguiente, el motor eléctrico está seguro contra corrientes elevadas y sus corrientes transitorias están dentro del rango del breaker. Esto es importante ya que, si las corrientes transitorias exceden la capacidad del breaker, este abrirá el circuito y el motor eventualmente se detendrá.

Paso 3:

Para conocer la medida de los cables a utilizar, se tomó como base la Tabla 5.2.2-3. En esta se puede corroborar que el breaker a utilizar (NEC for heavy start) corresponde a uno de 60 Amperes y que la medida mínima del cable (Minimum Copper Wire AWG) para este caso debe ser de AWG 10.

Una vez dimensionados los componentes para la maniobra eléctrica, se procedió a adquisición e instalación de los mismos. Para la puesta en marcha y; como medida de seguridad para el equipo, se instaló al lado del panel eléctrico del laboratorio de máquinas herramientas, un centro de carga con su respectivo breaker de 120/240 V, 60 A y utilizando alambre calibre AWG 10, tal y como se aprecia en la Figura 5.2.2-1.

**Table 430.248 Full-Load
Currents in Amperes, Single-
Phase Alternating-Current
Motors**

Horse- power	115 Volts	200 Volts	208 Volts	230 Volts
$\frac{1}{6}$	4.4	2.5	2.4	2.2
$\frac{1}{4}$	5.8	3.3	3.2	2.9
$\frac{1}{3}$	7.2	4.1	4.0	3.6
$\frac{1}{2}$	9.8	5.6	5.4	4.9
$\frac{3}{4}$	13.8	7.9	7.6	6.9
1	16	9.2	8.8	8.0
$1\frac{1}{2}$	20	11.5	11.0	10
2	24	13.8	13.2	12
3	34	19.6	18.7	17
5	56	32.2	30.8	28
$7\frac{1}{2}$	80	46.0	44.0	40
10	100	57.5	55.0	50

Tabla 5.2.2-1. Corriente a máxima carga en Amperes, motores de corriente alterna monofásicos. Cortesía de NEC (National Electric Code), United States of America.

Table 430.52 Maximum Rating or Setting of Motor Branch-Circuit Short-Circuit and Ground-Fault Protective Devices

Type of Motor	Non-time Delay Fuse	Percentage of Full-Load Current Dual Element (Time-Delay) Fuse	Instantaneous Trip Breaker	Inverse Time Breaker
Single-phase motors	300	175	800	250
AC polyphase motors other than wound-rotor Squirrel cage	300	175	800	250
other than Design B energy-efficient				
Design B energy-efficient	300	175	1100	250
Synchronous	300	175	800	250
Wound rotor	150	150	800	150
Direct current (constant voltage)	150	150	250	150

Tabla 5.2.2-2. Máximo índice o ajuste de cortocircuito del derivado de circuito del motor y dispositivos protectores de falla a tierra. Cortesía de NEC (National Electric Code), United States of America.

Motor Circuit Protection Tables



230Vac Single-Phase Motors & Circuits (220-240Vac Systems)

1	2	3		4	5	6	7	8	9	10
Motor Size	Motor FLA	Fuse		Optimal Branch Ckt Protection	NEC* Max for Gen. Applic 430.52(C)(1) Exc. No. 1	NEC* Max for Heavy Start 430.52(C)(1) Exc. No. 2	Minimum Switch Size 430.110	Minimum NEMA Starter NEMA ICS 2-2000 Size ²	Minimum Copper Wire THWN or THHN AWG or KCMIL Table 310.16 Size	Minimum Rigid Metallic Conduit Annex C Table C8 Inches
Table 430.248 HP	Table 430.248 AMPS	Type	Class	AMPS ¹	AMPS ¹	AMPS ¹	AMPS			
1/4	2.2	LPJ-SP TCF LP-CC LPN-RK_SP FRN-R	J Jr CC RK1 RK5	3 1/2 6 4 1/2 3 2 1/2	6 6 10 6 6	6 6 10 6 6	30	00	14	3/8
1/4	2.9	LPJ-SP TCF LP-CC LPN-RK_SP FRN-R	J Jr CC RK1 RK5	4 1/2 6 6 4 4	6 6 10 6 6	6 6 10 6 1/2 6 1/2	30	00	14	3/8
1/4	3.6	LPJ-SP TCF LP-CC LPN-RK_SP FRN-R	J Jr CC RK1 RK5	5 1/2 6 7 5 4 1/2	10 6 15 10 10	10 6 15 10 10	30	00	14	3/8
1/4	4.9	LPJ-SP TCF LP-CC LPN-RK_SP FRN-R	J Jr CC RK1 RK5	8 10 10 8 6 1/2	10 10 15 10 10	10 10 15 10 10	30	00	14	3/8
1/2	6.9	LPJ-SP TCF LP-CC LPN-RK_SP FRN-R	J Jr CC RK1 RK5	12 15 15 9 9	15 15 25 15 15	15 15 25 15 15	30	00	14	3/8
1	8	LPJ-SP TCF LP-CC LPN-RK_SP FRN-R	J Jr CC RK1 RK5	12 15 25 12 10	15 15 25 15 15	17 1/2 17 1/2 30 17 1/2 17 1/2	30	00	14	3/8
1 1/2	10	LPJ-SP TCF LP-CC LPN-RK_SP FRN-R	J Jr CC RK1 RK5	15 15 30 15 15	20 20 30 20 20	20 20 30 20 20	30	0	14	3/8
2	12	LPJ-SP TCF LP-CC LPN-RK_SP FRN-R	J Jr CC RK1 RK5	20 20 25 17 1/2 15	25 25 — 25 25	25 25 — 25 25	30	0	14	3/8
3	17	LPJ-SP TCF LPN-RK_SP FRN-R	J Jr RK1 RK5	30 30 25 25	30 30 30 30	35 35 35 35	30*	1	12	3/8
5	28	LPJ-SP TCF LPN-RK_SP FRN-R	J Jr RK1 RK5	45 45 40 35	50 50 50 50	60 60 60 60	60	2	10**	3/8
7 1/2	40	LPJ-SP TCF LPN-RK_SP FRN-R	J Jr RK1 RK5	60 60 60 50	70 70 70 70	90 90 90 90	60*	2	8**	3/8**
10	50	LPJ-SP TCF LPN-RK_SP FRN-R	J Jr RK1 RK5	80 80 70 70	90 90 90 90	110 — 110 110	100*	3	6**	3/8**

* Switch size must be increased if the amp rating of the fuse exceeds the amp rating of the switch.

† Per 430.52(C)(2), if the motor controller manufacturer's overload relay tables state a maximum branch circuit protective device of a lower rating, that lower rating must be used in lieu of the sizes shown in Columns 4, 5, or 6.

** If equipment terminations are rated for 60°C conductors only, the 60°C conductor ampacities must be utilized and the entire larger conductor sizes or conduit sizes may be required.

‡ Class J performance, special finger-salt dimensions.

Tabla 5.2.2-3. Tabla de protección de circuitos de motores. Cortesía de Cooper Bussmann Inc.

Nota: El color azul refiere a los datos correspondientes al breaker, mientras que el color rosado al mínimo calibre de alambre permisible.



Figura 5.2.2-1. Panel eléctrico (derecha) del laboratorio de máquinas herramientas. Centro de carga y breaker del sistema de compresión de aire (izquierda). A como puede observarse, se ha derivado del panel del laboratorio un subpanel correspondiente al sistema de compresión de aire.

De igual manera, se adquirió un cable eléctrico protoduro AWG 10 (Figura 5.2.2-2), el cual es congruente con los parámetros eléctricos descritos en la Tabla 5.2.2-3. Asimismo, se obtuvo una unidad de toma superficial y una de enchufe; ambos de 50A y 125-250V, tal y como se observa en la Figura 5.2.2-3 y Figura 5.2.2-4, respectivamente. Esto permite agregarle mayor nivel de seguridad a la instalación, ya que el motor eléctrico del sistema de compresión de aire no estará siempre conectado a la red eléctrica; es decir, puede desconectarse y conectarse a voluntad, lo que hace posible que las labores de mantenimiento sean más seguras de ejecutar.



Figura 5.2.2-2. Cable eléctrico protoduro AWG 10.



Figura 5.2.2-3. Toma superficial EAGLE de 50A y 125-250V.



Figura 5.2.2-4. Enchufe EAGLE de 50A y 125-250V.

5.3 Líneas futuras

En virtud de una optimización del sistema de arranque del motor eléctrico, se recomienda el uso de un arrancador suave (en inglés, soft starter). Los arrancadores suaves (Figura 5.2.2-1) son dispositivos diseñados para reducir tanto el pico de las corrientes transitorias, como el par en el arranque del motor. Esto se logra gracias a la utilización de tiristores, variando el ángulo de disparo para controlar la tensión aplicada al motor.

Beneficios de emplear arrancadores suaves (Metrobras Automatización, 2016):

1. Reduce el desgaste en los elementos transmisores de potencia, tales como: poleas, bandas, cadenas, catarinas, rodamientos, etc. Esto se fundamenta debido a que actúa un menor par de arranque sobre el eje del motor, reduciendo de esta manera los esfuerzos de contacto y, por tanto, el desgaste; así como también los esfuerzos torsionales y flexionantes sobre el eje.
2. Reduce la demanda de corriente en el arranque. Cuando un motor se alimenta directamente de la red, sus corrientes transitorias de arranque pueden alcanzar entre 4 a 10 veces la corriente nominal del motor. Mediante un arrancador suave, se puede reducir este intervalo a 2.5 a 5.
3. Extiende la vida útil del motor. Mientras menor corriente circule por los devanados del estator, la energía perdida por efecto Joule será menor y, por ende, el incremento de temperatura de los componentes del motor será menor.
4. Mayor protección para el motor. Los arrancadores suaves traen consigo protección para secuencia de fase, sobrecarga, sobretensión, subtensión, corriente de falla a tierra, cortocircuito, etc.



Figura 5.2.2-1. Arrancadores suaves de diferente capacidad.

5.4 Pruebas realizadas

Una vez restaurado el sistema de compresión de aire y habilitada la red eléctrica en el laboratorio, se procedió a la realización de un conjunto de pruebas (ver Tabla 5.2.2-1) in situ.

Nombre de prueba	Fecha de realización	Comentarios
Hermeticidad	9/11/2016	El equipo conserva muy bien la presión dentro del tanque. Se presentó una minúscula fuga de aire en una conexión roscada de la válvula antiretorno, la cual fue solucionada con un sellador de roscas.
Llenado	9/11/2016	El tanque de almacenamiento alcanza la presión de 100 psi (partiendo desde 0 psi) en un tiempo aproximado de 5 minutos (300 segundos).
Vaciado	10/11/2016	Al operar la manguera de forma continua, la presión del tanque descendió de 105 psi (aproximadamente) hasta alrededor de 75 psi en un tiempo de 113 segundos.

Corte del presostato	10/11/2016	El presostato corta el suministro eléctrico en 100 psi, y lo reanuda en 70 psi, aproximadamente.
----------------------	------------	--

Tabla 5.2.2-1. Pruebas realizadas al sistema de compresión de aire y sus respectivos comentarios.

5.5 Análisis económico

Para ejecutar el siguiente análisis se ocuparán las tablas de anexos (capítulo VIII). Con el objetivo de realizar las labores de mantenimiento al sistema de compresión de aire y permitir su puesta en marcha, se tuvo que incurrir en diversos costos. Estos se clasifican en: costos por instalación eléctrica (Tabla 5.6.2-1) y costos por mantenimiento del sistema de aire comprimido (Tabla 5.6.2-2).

El costo total del proyecto de mantenimiento del sistema de compresión de aire y su puesta en marcha se muestra en la Tabla 5.6.2-3. A como se puede apreciar, el costo por instalación eléctrica representa el 30.48% (cerca de la tercera parte) del total de la inversión; esto debido a la falta de una red eléctrica funcional en el laboratorio de máquinas herramientas.

La viabilidad de la actividad de mantenimiento se demuestra claramente en la Tabla 5.6.2-4, donde el costo de la restauración del sistema de compresión de aire representa el 20.87% del valor de una unidad similar completamente nueva. Esto indica que, a pesar del exagerado descuido y deterioro del equipo, se logró dar solución a la necesidad de un equipo de aire comprimido y a un costo potencialmente menor en comparación a una unidad nueva.

5.6 Plan de mantenimiento y diagnóstico de fallas

En este acápite se brinda información relativa al proceso de mantenimiento que se tiene que llevar a cabo sobre el sistema de compresión de aire marca Campbell Hausfeld; esto con el objetivo de prolongar su vida útil y de reducir los costos por

paradas. De la misma manera, se brinda una guía para diagnosticar y resolver los problemas que puedan afectar el funcionamiento del equipo.

5.6.1 Plan de mantenimiento

Advertencia: Antes de dar algún tipo de servicio, ya sea de mantenimiento o de instalación, baje el breaker ubicado en el centro de carga del sistema de compresión de aire. A continuación, desconecte el cordón eléctrico y revise que la diferencia de potencial entre las líneas vivas del presostato marque 0. Bajo ninguna circunstancia se deben tocar las terminales de los capacitores; el uso de guantes aislantes es obligatorio y los capacitores deben descargarse antes de trabajar con ellos.

- **Prueba para el funcionamiento adecuado de la válvula de seguridad:**

Esta prueba tiene que realizarse semanalmente y estos son sus pasos:

1. Hale el anillo de la válvula de seguridad y deje que regrese a su posición original. Si hay pérdidas o fugas de aire después de soltar el anillo, o si la válvula está atascada y no se puede activar mediante el anillo, debe ser reemplazada. Nunca trate de modificar esta válvula.
2. Con el motor apagado, el cordón eléctrico desconectado y el breaker abajo (off), limpie el motor, el volante, el tanque, las líneas de aire y las aletas de enfriamiento del cabezal.

*Precaución: Si se acciona la válvula de seguridad mientras exista presión en el tanque, se liberará una gran cantidad de aire que se encuentra en movimiento a gran velocidad.

- **Bandas:**

Las bandas se estiran con el uso normal. Cuando se encuentra bien ajustada, la deflexión debe de ser de 12.7 mm (1/2") al aplicarle una carga correspondiente al peso de una masa de 2.27 kg (a nivel del mar) entre la polea del motor y el cabezal (Figura 5.6.1-1).

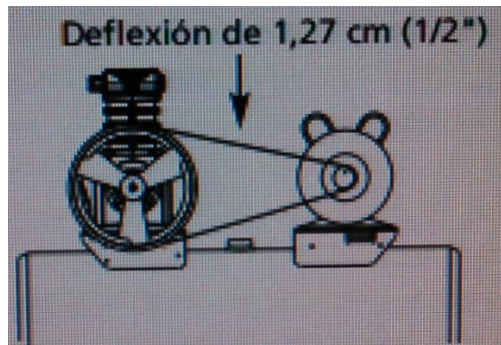


Figura 5.6.1-1. Deflexión de una banda bien ajustada.

Procedimiento para ajustar la banda:

1. Remueva la tapa.
2. Afloje los pernos que sostienen el motor a la base ubicada en el tanque.
3. Desplace el motor en la dirección adecuada. La banda debe estar bien alineada al hacer este ajuste.
4. Ajuste el volante o la polea del motor.
5. Si usted lo considera necesario, puede mover la polea del motor sobre el eje que la soporta. Apriete el perno una vez la polea está en la posición correcta.
6. Coloque la tapa de la banda.

• **Aceite:**

La compañía Campbell Hausfeld recomienda los siguientes tipos de aceite:

1. Aceite Campbell Hausfeld según el modelo de cabezal. Este tipo de aceite se puede localizar en la empresa Casa de las Mangueras S.A.
2. ISO-100 para temperaturas superiores a 55 grados Fahrenheit. Esto corresponde a un SAE-30, no detergente, verdadero aceite para compresor. No confunda este aceite con el aceite para vehículos tipo 10W-30.
3. ISO-68 para temperaturas inferiores a 55 grados Fahrenheit. Esto corresponde a un SAE-20, no detergente, aceite para compresor.
4. Aceites de automóviles totalmente sintéticos, como Mobile One y Royal Purple, pueden ser usados. Estos pueden ser encontrados en tiendas automotrices. También puede ser usado el Castrol Edge, SAE 10W-30.

Los aditivos en los aceites para motores de vehículos pueden ocasionar deposiciones de residuos en las válvulas, ocasionando deficiencias en la respiración y descarga del cabezal, contribuyendo también a la reducción de la duración del mismo. Es por esta razón que la compañía no recomienda los siguientes tipos de aceite:

1. Aceites automotrices, excepto totalmente sintéticos.
2. Fluido de transmisión automotriz.
3. Fluidos hidráulicos.
4. Aceites sintéticos basados en Diester.
5. Aceites para motores de combustión interna de dos tiempos.
6. Productos de tratamiento de aceites.

Procedimiento para el cambio de aceite:

1. Remueva el aceite, aflojando el perno de drenaje del aceite.
2. Remueva el perno que permite la entrada de aceite al cabezal.
3. Apriete el perno de drenaje de aceite (es recomendable colocarle cinta selladora de roscas (teflón)).
4. Vierta la cantidad de aceite necesaria para que este llegue al nivel superior del perno.
5. Apriete muy bien el perno de entrada de aceite.
6. Haga funcionar el sistema de compresión de aire durante 5 minutos, sin carga.
7. Verifique que no existan fugas de aceite en el cabezal.
8. El compresor está listo para el servicio.

- **Conexiones eléctricas:**

Recuerde que, antes de brindar un servicio de mantenimiento o de instalación a este sistema, es obligatorio bajar (colocar en off) el breaker, desconectar el cordón (cable) eléctrico de alimentación y verificar que la diferencia de potencial (voltaje) entre las líneas sea cero.

Las conexiones eléctricas deberán verificarse en la primera quincena de cada mes, evaluando el estado de cables de alimentación y artefactos eléctricos, tales como enchufes, breaker, entre otros (UNESCO, 1998). Apriete bien las conexiones y reemplace los componentes si se encuentran dañados.

- **Motor eléctrico:**

Recuerde que, antes de brindar un servicio de mantenimiento o de instalación a este sistema, es obligatorio bajar (colocar en off) el breaker, desconectar el cordón (cable) eléctrico de alimentación y verificar que la diferencia de potencial (voltaje) entre las líneas sea cero. Luego, si se van a remover los capacitores, es necesario descargarlos para trabajar con seguridad.

El relé centrífugo debe limpiarse y lubricarse cada 6 meses; puede ocuparse el mismo aceite de lubricación del cabezal (SAE 10W-30 sintético).

Los capacitores (de arranque y de marcha) deberán reemplazarse cada 18 meses, o hasta que la falla se presente.

Los rodamientos deberán reemplazarse cada 2 años, en base a un tiempo de uso del motor eléctrico correspondiente a 8 horas semanales (Mott, Robert L., 2006).

- **Cabezal:**

Cada vez que el cabezal sea rearmado (luego de un uso extendido), deberán usarse nuevas juntas de estanqueidad.

Una guía para la frecuencia recomendable de inspección de válvulas no puede ser dada, dado que esto depende mucho del tipo de compresor, condiciones de operación y tipo de gas comprimido (Bloch & Hoefner, 1996); sin embargo, las válvulas (flappers) deberán ser inspeccionadas periódicamente y convendrá reacondicionar o reemplazar los componentes dañados. Se recomienda que la inspección y limpieza de las válvulas se lleve a cabo antes de que se cumpla el año de funcionamiento.

Los rodamientos del cigüeñal deberán cambiarse cada 3 años, o al menos ser debidamente inspeccionados.

Los cilindros y pistones deben ser inspeccionados y medidos para detectar desgastes excesivos y/o asimétricos, así como también grietas en su superficie. Se puede aprovechar el momento en que se le brinda mantenimiento a las válvulas y así realizar inspecciones visuales y de mediciones (Bloch & Hoefner, 1996).

Los anillos del pistón deben ser reemplazados cuando la holgura se vuelva muy grande y ocurra un reflujo del gas. La holgura tiene lugar cuando los anillos están muy desgastados, ocurre un desgaste del diámetro del cilindro o cuando existen raspaduras en la superficie del anillo debido a deficiencias en la lubricación (Bloch & Hoefner, 1996).

A continuación, se presenta un breve cuadro parcial (Tabla 5.6.1-1) de las actividades de mantenimiento que se aplican al sistema de compresión de aire.

Actividad	Mantenimiento			
	Diaria- mente	Semanal- mente	Mensual- mente	Trimestral- mente
Medición del nivel de aceite				
Drenado del tanque				
Inspección de las conexiones eléctricas				
Chequeo del filtro de aire				
Chequeo de la válvula de seguridad				
Limpieza de la unidad				
Chequeo de la tensión de la banda				
Cambio de aceite				

Tabla 5.6.1-1. Actividades de mantenimiento básicas para el sistema de compresión de aire.

Nota: No todas las actividades de mantenimiento se cubren en esta tabla. Verificar en los párrafos anteriores para una información más detallada.

5.6.2 Guía de diagnóstico de fallas

A continuación se abordan algunos problemas comunes encontrados en sistemas de compresión de aire, junto con sus posibles causas y acciones a tomar para resolver el problema (Campbell Hausfeld, 2011). Se recomienda que combine esta guía de diagnóstico (Figura 5.6.2-1 y Figura 5.6.2-2) con un plan integral de mantenimiento.

Problema	Posible(s) Causa(s)	Acción a Tomar
Baja presión de descarga	<ol style="list-style-type: none"> 1. La demanda de aire excede la capacidad de la bomba 2. Pérdidas de aire 3. Entrada de aire restringida 4. Juntas defectuosas 5. Válvulas dañadas o con pérdidas. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Reduzca la demanda de aire o utilice un compresor de mayor capacidad. 2. Escuche para detectar pérdidas de aire. Aplique una solución jabonosa a todos los accesorios y conexiones. Aparecerán burbujas en los puntos donde existan pérdidas. Ajuste o reemplace los accesorios o conexiones con pérdidas. 3. Limpie el elemento del filtro de aire. 4. Reemplace cualquier junta que pruebe estar defectuosa al inspeccionarla. 5. Quite el cabezal e inspecciónelo para detectar posibles roturas de la válvula, válvulas desalineadas, asientos de válvulas dañados, etc. Reemplace las piezas defectuosas y vuelva a armar. <p>PRECAUCION <i>Instale una nueva junta para el cabezal cada vez que éste sea quitado.</i></p>
El sobrecalentamiento de la bomba derrite el filtro	<ol style="list-style-type: none"> 1. No está la junta de aislamiento entre el filtro y el cabezal 2. Válvulas rotas/juntas defectuosas 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Instale la junta. 2. Reemplace las válvulas o instale una junta nueva.
Ruido excesivo (golpeteo)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Motor o polea del compresor floja 2. Falta de aceite en el cárter 3. Biela gastada 4. Diámetros del eje del émbolo desgastados 5. El émbolo pega contra la placa de la válvula 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Es común que el motor o las poleas del compresor flojas causen golpeteo de los compresores. Ajuste los tornillos de los sujetadores de la polea y los tornillos de montaje. 2. Controle si el nivel de aceite es el adecuado; si está bajo, verifique la posibilidad de que los cojinetes estén dañados. El aceite sucio puede causar un desgaste excesivo. 3. Reemplace la biela. Mantenga el nivel de aceite y cambie el aceite con más frecuencia. 4. Quite los ensamblajes del émbolo del compresor e inspecciónelos para detectar un desgaste excesivo. Reemplace el eje del émbolo(s) si está excesivamente desgastado o según necesario. Mantenga el nivel de aceite y cambie el aceite con más frecuencia. 5. Quite el cabezal del compresor y la placa de la válvula e inspeccione para detectar depósitos de carbón u otros elementos extraños en la cabeza del émbolo. Vuelva a colocar el cabezal y la placa de la válvula utilizando una junta nueva. Consulte la sección de lubricación para el aceite recomendado.

Figura 5.6.2-1. Guía de diagnóstico de fallas de Campbell Hausfeld.

Problema	Posible(s) Causa(s)	Acción a Tomar
Ruido excesivo (golpeteo) - Continuación	6. Válvula de verificación ruidosa en el sistema del compresor	6. Reemplácela. PELIGRO No desarme la válvula de verificación con presión de aire en el tanque.
Aceite excesivo en el aire de descarga. NOTA: En un compresor lubricado con aceite siempre hay una pequeña cantidad de aceite en el flujo de aire.	1. Aros del émbolo desgastados 2. La entrada de aire del compresor está restringida 3. Demasiado aceite en el compresor 4. Viscosidad del aceite equivocada	1. Reemplácelos con aros nuevos. Mantenga el nivel de aceite y cambie el aceite con más frecuencia. 2. Limpie el filtro. Verifique otras restricciones en el sistema de entrada. 3. Escúrralo hasta que alcance el nivel de lleno. 4. Use Mobil 1® 10W-30.
Agua en el aire de salida o en el tanque	1. Operación normal. La cantidad de agua aumenta con el clima húmedo	1. Drene el tanque con más frecuencia. Al menos diariamente. 2. Agregue un filtro
El motor zumba y funciona lentamente o no funciona en lo absoluto	1. Utiliza un cordón de extensión 2. Malfuncionamiento de la válvula de verificación o de la válvula de descarga 3. Voltaje bajo 4. Malfuncionamiento del interruptor presión, los contactos no se cierran	1. No utilice un cordón de extensión. Utilice una manguera de aire más larga con un diámetro mayor. 2. Reemplace la válvula de verificación, la válvula de descarga o el interruptor de presión. PELIGRO No desarme la válvula de verificación con presión de aire en el tanque. 3. Verifique con un voltímetro, revise el interruptor de reajuste del motor. Si este se dispara varias veces, busque la causa y corrijala. Consulte el siguiente punto. 4. Repare o reemplace el interruptor de presión.
El mecanismo de reajuste intermite el funcionamiento constantemente o los fusibles se funden con frecuencia	1. Demasiados aparatos en el mismo circuito 2. Tamaño incorrecto del fusible o del disyuntor 3. Malfuncionamiento de la válvula de verificación 4. Interruptor de presión fijado demasiado alto 5. Cableado flojo 6. Malfuncionamiento del motor	1. Use sólo el compresor de aire en el circuito. 2. Asegúrese de que los fusibles o los disyuntores sean del tamaño adecuado. 3. Reemplace la válvula de verificación PELIGRO No desarme la válvula de verificación con presión de aire en el tanque. 4. Ajuste o reemplace el interruptor. 5. Verifique todas las conexiones eléctricas 6. Reemplace el motor
El tanque no mantiene la presión cuando el compresor está apagado y la válvula de cierre está cerrada	1. Válvula desgastada 2. Verifique todas las conexiones y los accesorios para detectar fugas 3. Revise el tanque para detectar fisuras o perforaciones	1. Reemplace la válvula. PELIGRO No desarme la válvula de verificación con presión de aire en el tanque. 2. Apriete. 3. Reemplace el tanque. Nunca repare un tanque dañado
El interruptor de presión tira continuamente aire por la válvula de descarga	1. Malfuncionamiento de la válvula	1. Reemplace la válvula de verificación si la válvula de descarga tiene pérdidas constantemente. PELIGRO No desarme la válvula de verificación con presión de aire en el tanque.
El interruptor de presión no libera el aire cuando la unidad de apaga	1. Malfuncionamiento de la válvula de descarga en el interruptor de presión	1. Reemplace el interruptor de presión si éste no libera la presión por un breve período de tiempo cuando se apaga la unidad. PELIGRO No desarme el interruptor de presión si hay presión en el tanque.
Vibración excesiva	1. Ajustadores flojos 2. La correa necesita ser reemplazada 3. Alineación de la correa	1. Ajústelos. 2. Reemplace la correa con otra del tamaño adecuado. 3. Alinee el volante y la polea.

Figura 5.6.2-2. Continuación de guía de diagnóstico de fallas de Campbell Hausfeld.

VI. Conclusiones y Recomendaciones

1. Conclusiones

A lo largo del desarrollo del trabajo monográfico se llegaron a las siguientes conclusiones:

- El sistema de compresión de aire responde a las necesidades reales de mantenimiento de los equipos del laboratorio de máquinas herramientas.
- La determinación de los problemas existentes en cada componente del sistema fue desarrollada satisfactoriamente a través del proceso de diagnóstico.
- La actividad de mantenimiento fue desarrollada gracias a la labor conjunta del procedimiento de realización del mantenimiento y de la selección adecuada de los componentes a utilizar.
- La contribución positiva en aspectos como la protección del equipo y la seguridad operacional fue posible gracias al diseño e instalación de un circuito de maniobra eléctrica.
- La activación del sistema de compresión de aire permitirá ampliar el rango de funciones de este mediante el acoplamiento de herramientas neumáticas; esto con el objetivo de potenciar la capacidad del laboratorio de máquinas herramientas.

2. Recomendaciones

A lo largo del desarrollo del trabajo monográfico se identificaron las siguientes recomendaciones:

- El diseño e instalación de un arrancador suave (soft starter) para el motor eléctrico; esto con el objetivo de disminuir el par y la corriente de arranque del motor.
- Mejorar las instalaciones eléctricas en el laboratorio de máquinas herramientas, perteneciente a la Facultad de Tecnología de la Industria (F.T.I.).

- Cumplimiento del tiempo e indicaciones planteadas que permitan una mejor operación del sistema y una mayor vida útil del mismo.
- Elaboración de una jaula resistente para encerrar el sistema de compresión de aire. Esto es con la finalidad de brindar mayor protección a las personas en caso de una explosión.

VII. Bibliografía consultada

1. Bloch, H., & Hoefner, J. (1996). Reciprocating Compressors, Operation and Maintenance (First Edition). United States of America: Gulf Publishing Company, Houston, TX.
2. José Ángel Manrique Valadez. (2005). Termodinámica (Tercera edición). México: Alfaomega.
3. ASA Co. (s/f). Reciprocating Compressor. Recuperado el 15 de agosto de 2016, a partir de <http://www.asacomp.ir/design/reciprocating/>.
4. Jesús Jiménez. (2016, mayo 18). Compresores Neumáticos. Recuperado a partir de <http://jesusjimrep.blogspot.com/2015/05/compresores-neumaticos.html>.
5. JSW, The Japan Steel Works, LTD. (2014). Compresores de tipo laberinto. Recuperado el 23 de agosto de 2016, a partir de http://www.jsw.co.jp/en/products/reciprocating_compressor/labyrinth_piston.html.
6. Instrumentos WIKA. (2014, mayo 16). Como funciona un presostato electromecánico. Recuperado a partir de <http://www.bloginstrumentacion.com/blog/2014/05/16/cmo-funciona-presostato-electromagntico/>.
7. Válvula de alivio de presión. (2016, julio 31). En Wikipedia. Recuperado a partir de https://es.wikipedia.org/wiki/Válvula_de_alivio_de_presión.
8. Válvula anti-retorno. (2016, agosto 27). En Wikipedia. Recuperado a partir de https://es.wikipedia.org/wiki/Válvula_antirretorno.
9. Administración del mantenimiento. (s/f).
10. Stephen J. Chapman. (2012). Maquinas Eléctricas (Quinta edición). España: McGraw Hill.
11. Seccionador. (s/f). Recuperado el 30 de junio de 2016, a partir de <http://www.nichese.com/seccionador.html>.
12. Juan Luis Hernández. (2016, septiembre 16). Interruptor Automático Magnetotérmico. Recuperado a partir de <http://www.tuveras.com/aparamenta/magnetotermico.htm#comienzo>.

13. Metrobras Automatización. (2016). Conceptos de Selección Arrancadores Suaves. Recuperado a partir de <https://www.youtube.com/watch?v=7ZiHPeYWw94>.
14. UNESCO. (1998). Mantenimiento de instalaciones eléctricas del establecimiento educacional. Recuperado a partir de <http://unesdoc.unesco.org/images/0015/001586/158665s.pdf>.
15. Mott, Robert L. (2006). Diseño de elementos de máquinas (Cuarta edición). México: Pearson Educación.
16. Campbell Hausfeld. (2011, febrero). Operating Instructions-Stationary. Recuperado a partir de http://www.chpower.com/IMAGES/pdfs/manual05/227706_0211_web.pdf.

VIII. Anexos



8.1 Anexo A: Costos de restauración y cotización de compresor nuevo

BIEN O SERVICIO	CANTIDA D	PRECIO UNITARIO (EN CÓRDOBAS)	SUB TOTAL
BREAK 2X60 120/240V ENCHUF CH	1	882.24	882.24
CENTRO CARGA 2 ESPACIO 1F 70A SUPERF	1	898.89	898.89
ALAMB CAB THHN 10 ROJO CARRETE 1000M	10	17.48	174.8
ALAMB CAB THHN 10 VERDE CARRETE	10	17.48	174.8
ALAMB CAB THHN 10 NEGRO CARRETE	10	17.48	174.8
TUBO CONDUIT 1/2" X 10 PIES PVC	3	18.64	55.92
BRIDA EMT 1/2" 1 OREJA MET	2	1.66	3.32
CONECTOR CONDUIT 1/2" PVC	3	3.335	10
UNION CONDUIT 1/2" PVC	4	2	8
CURVA CONDUIT 1/2" X 900 PVC	2	5.65	11.3
T.C.M HULE 80-3P. 3L-30/50A 125-250V	1	135.64	135.64
T.C.H SUP. SENC. 3P. 3L. 50A. 250V	1	135.14	135.14
CABLE TSJ 3X10 PROT. UL 30AMP 600V 60	2	64.36	128.731
		Total	2793.581

Tabla 5.6.2-1. Costos asociados a la instalación eléctrica del sistema de compresión de aire.

BIEN O SERVICIO	CANTID AD	PRECIO UNITARIO (EN CÓRDOBAS)	SUB TOTAL
CAPACITOR DE MARCHA 15 MF 370V	1	50.84	50.84
CAPACITOR DE ARRANQUE 145-175 MF 220V	1	93.69	93.69
BROCHA 1" SERIE 500 A00682 PERFECT	1	13.79	13.79
LIJA DE TELA ESMERIL 9" X 11" GRANO 60	1	19.72	19.72



K246 NORTON			
1 L ACEITE CASTROL EDGE SAE 10W-30	1	309	309
1 L DE GAS KEROSENE	20	20	200
JUNTA DE ESTANQUEIDAD	4	100	400
AEROSOL POWER COLOR NEGRO BRILLANTE	1	45.08	45.08
MANÓMETRO A/A 200 PSI 1/4" MONT ABAJO	1	264.95	264.94
VÁLVULA DE ALIVIO 140 PSI P/COMPRESOR	1	596.68	596.68
TUBO DE COBRE DE 1/4" X 50 PIES.	3	25.85	77.55
(H-61F-04) TUERC COMPRESIÓN 1/4"	2	11.08	22.17
(H-60F-04) GLAND 1/4"	2	3.63	7.26
TUBO DE COBRE DE 1/2" X 50 PIES.	1.5	53.39	80
(H-60F-08) GLAND 1/2"	2	4.23	8.46
CAMISA DE BRONCE 1/4"	1	37.01	37.01
DRENO DE 1/4" NPP	1	90.85	90.85
MINI REGULADOR 1/4" NPT MANOMETRO	1	390.05	390.05
PISTOLA SOPLETEADORA	1	107.67	107.67
(H-110B-12X04) REDUCT 3/4 X 1/4"	1	100.94	100.94
(H-122B-04) NIPLE 1/4"	1	29.12	29.12
MANG. PROM 1/4" X 35 PIES.	1	428.01	428.01
(H-61F-08) TUERC COMPRESION 1/2"	2	22.2	44.41
ORINGS 11X4	1	21.54	21.54
TAPON MACHO DE BRONCE DE 1/8 "	1	24.92	24.92
VALVULA CHECK 1/2" C/AGU 1/8 NPT	1	681.39	681.39
PRESOSTATO	1	1598.12	1598.12
CONECTOR M COMP RECT	1	33.74	33.74
		Total	5776.95

Tabla 5.6.2-2. Costos asociados al mantenimiento integral del sistema de compresión de aire.

TIPO DE COSTO	SUBTOTAL (CÓRDOBAS)
COSTO ASOCIADO A INSTALACIÓN ELÉCTRICA	2,793.58
COSTO ASOCIADO A MANTENIMIENTO	6371.95
TOTAL	9165.53

Tabla 5.6.2-3. Costo total de la restauración del sistema de compresión de aire.

MANTENIMIENTO INTEGRAL Y RESTAURACIÓN DEL SISTEMA DE COMPRESIÓN DE AIRE	6371.95
SISTEMA DE COMPRESIÓN DE AIRE TOTALMENTE NUEVO	30,528.14
PORCENTAJE QUE REPRESENTA LA RESTAURACIÓN SOBRE LA COMPRA DE UN NUEVO SISTEMA DE COMPRESIÓN DE AIRE	20.87%

Tabla 5.6.2-4. Comparación de precios y porcentaje del costo de mantenimiento con relación a un sistema de compresión de aire nuevo. Los precios están en córdobas.